

地幔快速隆起对构造地震的触发作用

丁文镜

(清华大学工程力学系)

提 要

本文应用弹性半无限空间内均匀膨胀的球体对球上介质的作用,作为地幔快速上涌触发构造地震的力学模型。按照地面垂直位移的年变化率,利用这个模型反推出这种虚拟的膨胀球的半径和膨胀强度。并计算出它在地壳中产生的附加应力。尽管此种附加应力比驱动地壳水平运动的力要小得多,但它能在高倾角断层上引起张性的法向应力,而且在隆起区内还有较高的附加剪应力。这些应力比固体潮、地极移动和地球转速变化等因素产生的附加应力都大得多。因此,地幔快速上涌对构造地震的触发作用应该比上述诸因素更大。由于近十余年来我国不少地区的走滑型强震大都发生在地壳上隆区或者在其边缘,而且发震断层都是高倾角断层,因此,本文能够对此作粗浅的解释。

(一) 引 言

近十余年来,我国大陆地区处于地震活动期,陆续发生多次六级(M_s)以上的强震,例如,1966年的邢台地震,1969年的阳江地震,1975年的海城地震,以及1976年的唐山地震。都发生在地壳上隆区或在其边缘。这一事实促使人们考虑地幔地质上涌推动地壳上升,可能是引起浅源构造地震的一个重要因素。^{1)[1-3]}

首先应该指出,取决于地幔物质上涌的速度不同,会引起两种绝然不同的地面运动。其中一种是地幔物质缓慢上涌,例如每年上升量小于0.1毫米,这时,由于地幔物质上涌使重力势增加,地壳的垂向重力荷载增长,在重力均衡规律支配下,地壳介质要向四周流动,直到平衡状态为止,最终形成凹陷盆地。^[4-5]显然,这时地壳的流变起了决定性作用。因此,对这种情况必须将地壳看成流变体。与此相反,另一种是地幔物质快速上涌,但其持续时间较短。例如,每年上升量达到几个毫米甚至更高的数值,持续时间在几年到几十年之间。由于地幔物质上涌速度超过地壳流变使地壳变薄的速度,因而地面会随地幔物质上涌而上升。这时,可以将地壳介质近似看作弹性体^[4、5]。事实上,近十余年来我国某些震区测量

1) 高名修等 华北地区新生代地槽构造及其地震活动 地震战线 1975年第3期

的资料表明,地壳上升速度常达每年几毫米的量级,应属于后一种情况。

为了能说明短期的地幔快速上涌能够触发浅源构造地震,必须计算地幔上涌时在地壳中引起的附加应力。为此,本文选用半无限体内均匀膨胀球体对其上介质的推举作用,作为地幔快速上涌推动地壳上升的力学模型,导出地壳位移和应力间的解析公式,根据地震前在震区实测的地壳垂直位移的数据,计算出地壳上升时引起的附加应力。并将其与固体潮、地极移动和地球转速变化在地壳中引起的附加应力比较,计算结果表明,前者确实比后者大许多倍。因此,可以认为地幔物质快速上涌比上述诸因素对浅源构造地震的触发作用更大。

(二) 力学模型

板块消减带插入地幔后,地壳介质在高温高压条件下经过复杂的物理化学变化,矽铝质较多的物质受重力分异作用支配向上浮起,导致地幔物质上涌;此外,Hess于1955年指出,橄榄岩在莫霍面下温度处于 500°C 的条件下可以转变成蛇纹石,其体积可增长25%,也会引起地幔物质上涌。单纯从地壳底部边界受力状况看,上述几种物理过程对地壳产生的荷载基本上是相同的,都能在地壳底层产生沿法线方向的分布力,如图1所示。在此种分布力作用下,地壳将向上隆起。

按照图1中所给的边界条件计算局部上隆地壳中的应力,乃是弹性力学中的厚板问题。不能导出简洁的解析结果。为了得到近似解析结果,必须采用另一种简化模型。E. M. Anderson和W. J. Phillips利用地壳下均匀膨胀球模型分别研究了不同地质构造的形成机制[6、7]。本文也采用这个模型研究地幔快速上涌对地壳的作用。

在半无限空间中,埋藏一个膨胀强度为 A 的球体,其半径为 a ,从球心到半无限体界面的距离为 c ,如图2所示。建立直角坐标系 $O-XYZ$, Z 轴沿铅垂方向向下并通过膨胀球的

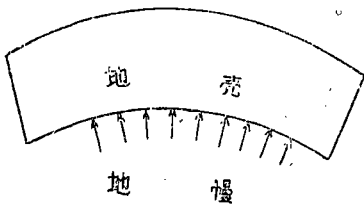


图 1

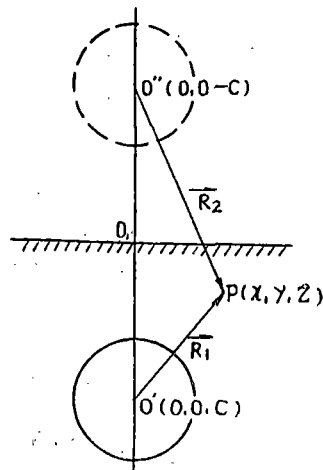


图 2

中心 $O'(0, 0, c)$ 。 X 和 Y 轴在半无限体的界面上(即水平面)。R. D. Mindlin等已经求得膨胀球外半空间中的应力和位移的解析式[8]。半无限体内任意点 $P(X, Y, Z)$ 的位移向量为

$$\vec{u} = \frac{4\pi Aa^3}{3} \left\{ \frac{\vec{R}_1}{R_1^3} + \frac{(3-4\nu)\vec{R}_2}{R_2^3} - \frac{6Z(Z+C)\vec{R}_2}{R_2^5} - \frac{2K[(3-4\nu)(Z+C)-Z]}{R_2^3} \right\} \quad (1)$$

式中, ν 为介质的泊松比, $\vec{K}$ 为 Z 轴方向的单位矢量, 矢量 $\vec{R}_1$ 和 $\vec{R}_2$ 分别为从膨胀球中心 O' (O, O, C) 及其镜像点 O'' ($O, O, -C$) 到任意点 $P(X, Y, Z)$ 的向量, 如图 2 所示。

即

$$R_1 = [X^2 + Y^2 + (Z-C)^2]^{1/2}$$

$$R_2 = [X^2 + Y^2 + (Z+C)^2]^{1/2}$$

利用 (1) 式, 可以求得半无限体内任意点 P 的各个应力分量, 可用柱坐标形式表示,

即

$$\sigma_\theta = \frac{8\pi Aa^3 G}{3} \left[\frac{1}{R_1^3} + \frac{3-8\nu}{R_2^3} - \frac{6Z(Z+C)}{R_2^5} + \frac{12\nu(Z+C)^2}{R_2^5} \right] \quad (2)$$

$$\sigma_r = \sigma_\theta - 8\pi Aa^3 Gr^2 \left[\frac{1}{R_1^3} + \frac{3-4\nu}{R_2^3} - \frac{10Z(Z+C)}{R_2^5} \right] \quad (3)$$

$$\sigma_z = \frac{8\pi Aa^3 G}{3} \left[\frac{1}{R_1^3} - \frac{1}{R_2^3} - \frac{18Z(Z+C)}{R_2^5} + \frac{3(Z+C)^2}{R_2^5} - \frac{3(Z-C)^2}{R_1^3} + \frac{30Z(Z+C)^3}{R_2^7} \right] \quad (4)$$

$$\tau_{rz} = -8\pi Aa^3 Gr \left[\frac{Z-C}{R_1^3} - \frac{3Z+C}{R_2^3} - \frac{10Z(Z+C)^2}{R_2^7} \right] \quad (5)$$

$$\tau_{\theta r} = \tau_{z\theta} = 0 \quad (6)$$

其中, G 为剪切弹性模量, 周向正应力 σ_θ 恰巧是中间主应力, 即 $\sigma_\theta = \sigma_2$, 因此, 最大和最小主应力分别为

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_r + \sigma_z}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_r - \sigma_z}{2} \right)^2 + \tau_{rz}^2} \quad (7)$$

$$\sigma_3 = \frac{\sigma_r + \sigma_z}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_r - \sigma_z}{2} \right)^2 + \tau_{rz}^2} \quad (8)$$

最大剪应力

$$\tau_{max} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_r - \sigma_z}{2} \right)^2 + \tau_{rz}^2} \quad (9)$$

(三) 按地面位移量推算附加应力

如上所述, 半无限体内膨胀球体外任意点的位移向量由 (1) 式给定。若令坐标 $Z = 0$, 即可由 (1) 式导出半无限体界面 (即地面) 上任意点的位移向量公式。众所周知, 基岩的泊松比 μ 接近 0.25, 因而地面的垂直位移的公式为

$$u_z = -\frac{4\pi Aa^3 C}{(X^2 + Y^2 + C^2)^{3/2}} \quad (10)$$

上式表明, 由于边界条件是轴对称的, 因而半无限体界面上以原点 O 为中心, 以 r 为半径的

圆周上的垂直位移量 u_z 取相同值, 即

$$[u_z]_{X^2+Y^2=r^2} = \frac{-4\pi Aa^3C}{(r^2+C^2)^{3/2}} \quad (11)$$

半无限体界面上半径分别为 r_1 、 r_2 和 r_3 的圆周上各点的垂直位移量为

$$u_{z1} = -\frac{4\pi Aa^3C}{(r_1^2+C^2)^{3/2}} \quad (12)$$

$$u_{z2} = -\frac{4\pi Aa^3C}{(r_2^2+C^2)^{3/2}} \quad (13)$$

$$u_{z3} = -\frac{4\pi Aa^3C}{(r_3^2+C^2)^{3/2}} \quad (14)$$

按以上三式分别绘制界面上的垂直位移等值线, 如图3所示。相邻的两条等值线的垂直位移的差值可用以下公式表示, 下式中 Δu_{z1} 和 Δu_{z2} 分别为垂直位移差值。

$$\Delta u_{z1} = 4\pi Aa^3C \left[\frac{1}{(r_1^2+C^2)^{3/2}} - \frac{1}{(r_2^2+C^2)^{3/2}} \right] \quad (15)$$

$$\Delta u_{z2} = 4\pi Aa^3C \left[\frac{1}{(r_2^2+C^2)^{3/2}} - \frac{1}{(r_3^2+C^2)^{3/2}} \right] \quad (16)$$

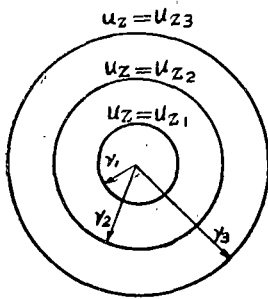


图 3

因此, 祇需从实测出的垂直位移等值线中挑选三条封闭曲线, 并算出相邻两条等值线的垂直位移的差值 Δu_{z1} 和 Δu_{z2} ,

将它们代入(15)和(16)式, 即可推算出膨胀球心的位置参数 C 和膨胀强度和球尺寸的综合参数 Aa^3 。若能估计或实测出当地的地壳厚度 H (大陆地壳厚度一般在35公里左右), 利用下列几何关系式

$$a = C - H \quad (17)$$

就能计算出膨胀球的半径, 并进一步推算出膨胀强度 A 的值。

因为地幔上涌物通常不是理想的球体, 所以它作用于地壳底层上的法向力不会是严格地呈轴对称分布。与此相应, 地面垂直位移等值线也就不可能是图3中表示的同心圆族。除此之外, 实测出的垂直位移还要受各种因素的干扰。其中包括降雨量和地下水抽吸量的影响, 以及地壳介质和地貌不规则的影响。一般说来, 实测出的垂直位移等值线形状都比较复杂。例如, 1975年海城7.3级地震前, 距离震中不远处出现了著名的庄河隆起, 其垂直位移等值线如图4所示。可以推测隆起中心应在黄海内^[9]。1976年唐山7.8级地震前, 从1959年到1969年期间内, 该区有明显的地壳隆起现象。从1968年到1969年的年垂直位移量最大, 国家地震局所属地震测量队在该区测量出的1968年至1969年的垂直变形等值线图表示于图5^[10]。不难看出垂直位移量为20毫米、10毫米和0毫米的等值线可用三个同心圆近似拟合, 即该图中的三个虚线圆。它们的半径分别为12公里、36公里和60公里。据此可以推算出该区垂直位移梯度的年变化率大约为0.4毫米/年·公里。虽然此值比1966年邢台地震和1969年阳江地震前

震区的垂直位移梯度的年变化率要大些,但相差不是很大¹⁾。因此,利用这个数值作计算仍然具有典型意义。

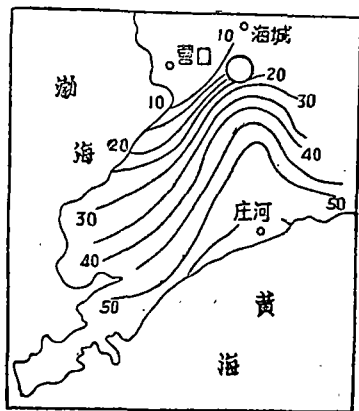


图 4

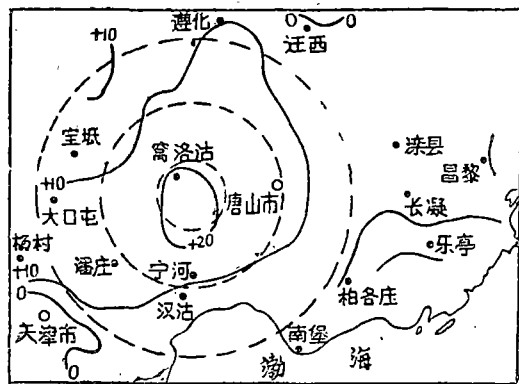


图 5

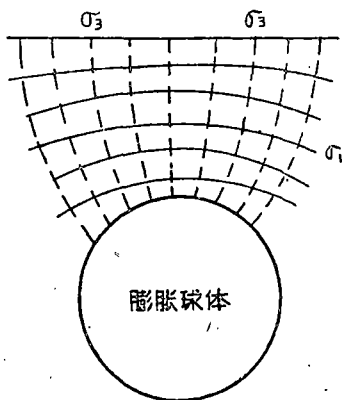


图 6

将上述数据代入(15)和(16)式中,即可算出膨胀球中心的深度 $C=70$ 公里,综合参数 $Aa^3=1.52 \times 10^{16}$ 毫米³。取地壳厚度 $H=35$ 公里,即可按(17)式算出膨胀球半径 $a=35$ 公里。从而求得膨胀强度 $A=3.64 \times 10^{-7}$ 。利用这些数据,由(2)–(5)式可算出地壳中产生的附加周向正应力 σ_θ 、径向正应力 σ_r 、垂向正应力 σ_z 和剪应力 τ_{rz} 。

首先,计算通过隆起中心和虚拟膨胀球心的对称轴上各点的应力。地壳介质的泊松比 ν 取0.25,剪切弹性模量 G 取 3×10^5 巴^[11]。因为对称轴上的剪应力 τ_{1z} 等于零,所以周向、径向和垂向正应力 σ_θ 、 σ_r 和 σ_z 均为主应力,而且正应力 $\sigma_\theta=\sigma_r$ 。计算结果表示于图7。由该图可以看出,离地表越近,垂向正应力 σ_z 越小;周向正应力在离地表20公里的范围内变化不大。

其次,计算深度为15公里水平面上的应力,它相当地壳中康拉德界面深度,唐山地震的震源深度与其很接近。计算结果表示于图8。

最后,按照(7)、(8)和(9)式计算 $H=15$ 公里深度上的最大主应力 σ_1 、最小主应力 σ_3 和最大剪应力 τ_{max} ,并将计算结果表示于图9。

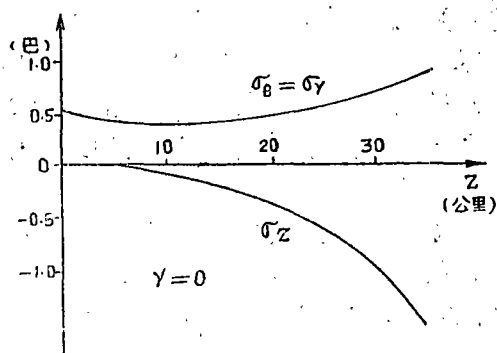


图 7

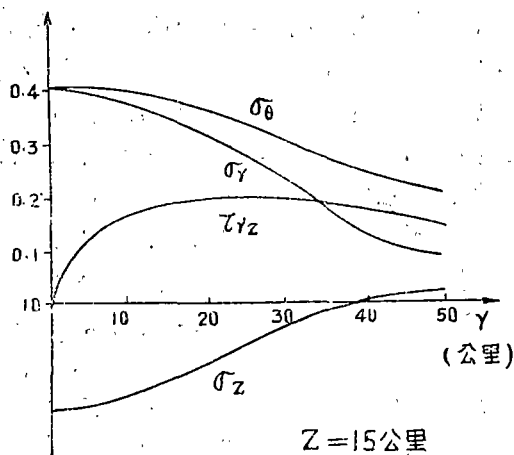


图 8

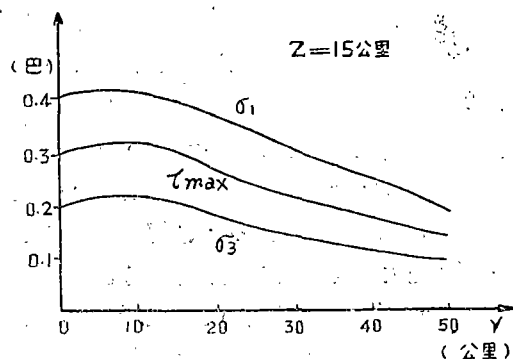


图 9

(四) 讨 论

上述分析计算结果揭示出地幔物质快速上涌时地壳中产生的附加应力的基本特点：

(1) 隆起区内地壳中的附加周向正应力 σ_θ 恰巧是中间主应力，它沿水平方向作用。由图6可以看出，最大主应力 σ_1 与水平方向不完全一致，但二者比较接近。

(2) 最大主应力 σ_1 和中间主应力 σ_2 均为张性应力。并且，这两个应力的数值相差不大（在隆起中心附近）。因此，在地壳上隆地区任何走向的高倾角断层，由于地幔物质上涌产生的附加正应力都是张性应力。并且，其数值与最大主应力的数值相差不大。

(3) 由图8和图9可以看出，地壳上隆区还产生一定数值的剪应力。附加的最大剪应力的数值与附加的最大正应力相差不大，但它作用的平面与铅垂轴夹角在 45° 左右。因而，在高倾角断层面上，由于地幔物质上涌产生的附加剪应力不很大。

众所周知，库伦-纳维强度理论能够较好地评判断层面抵抗剪切破坏的能力。根据这一理论使断层失稳破坏有两类不同的物理机制：第一种机制是减小断面上的压应力，第二种

机制是增加断层面上剪应力。

按照以上分析结果,由于地幔物质快速上涌在高倾角断层面上产生的张性正应力会减小断层面上原有的压应力,因此,它会促使高倾角断层面失稳破坏。震区应力场接近断层失稳的临界状态,即局部破裂可以沿断层面连续传播的一种状态。这时,由于地幔物质快速上涌使高倾角断层上的局部破裂发展成为巨观尺度的破坏,从而导致浅源构造地震。这就是地幔地质快速上涌触发浅源构造地震的物理机制。另一方面,由于高倾角断层上产生的剪应力很小,一般不会导致断层失稳。综上所述,地幔物质快速上涌触发高倾角断层走滑型地震的物理机制属于第一类机制,不是第二类机制。

除去地幔物质快速上涌外,固体潮、地极移动和地球转速变化都能在地壳中产生附加应力。其中,固体潮引起的附加应力最大,它在赤道上取最大值,可达到0.14巴的数值¹⁾;地极移动产生的附加应力要小些,当地轴偏转4角秒时,引起的附加应力约为0.07巴²⁾;地球自转速率变化引起的附加应力是更加微小的³⁾。总之,地幔物质快速上涌比上述诸因素在高倾角断层上产生的附加应力大得多,因此,在各类触发浅源构造地震的因素中,它是一种主要的触发因素。近来我国大陆地区发生的许多强震,高倾角断层走滑型地震非常多。例如,1966年隆尧6.8级地震的断层倾角为75°,宁晋6.7级地震的断层倾角为85°⁴⁾,宁晋7.2级地震的断层倾角为81°,1976年唐山7.8级地震的断层倾角为85°^[12]。因此,利用本文的研究结果可以讨论上述地震。应该指出,按照以上分析,在紧邻隆起中心的地区附加应力最大,可是上述地震的震中大多在隆起中心附近,而不是位于隆起中心及其紧邻地区。这可能与地壳介质的不均匀性和由此产生的原始应力场的状况有关。实际上,断层破坏都是从应力较高而且抗力最弱的部位开始的。如果隆起中心紧邻地区断层的抗力比其附近地区断层的抗力偏高,那么,地震震中偏离隆起中心将是很自然的现象。

最后,必须指出,有不少强震并不是发生在地壳上隆区及其附近。例如,1970年的通海地震和1967年的河间地震。因此,决不应该将地壳上隆作为发生强震的必要标志。事实上,与推动各大板块沿水平方向运动所需的应力相比较,地幔物质快速上涌在地壳中所产生的附加应力是很小的。这就是说,浅源构造地震的主要成因仍然应看成是各大板块和断块间的相互推挤。本文只是将地幔物质快速上涌与别种触发地震的因素作对比,说明它是一种主要的触发浅源构造地震的因素。由于地壳中高倾角断层分布极广,因而在地震预报实践中,加强对地壳上隆区的监视是很必要的。同时,由于地壳垂直变形的测量比水平地变形测量容易得多,因此,监测地壳上隆也是容易实现的。

(本文1981年7月6日收到)

1)北京地震队 潮汐应力与地震 研究报告 1975年

2)关于《地极应力与地震》的讨论 地震战线 1973年第3期

3)王仁 地球自转速率变化推动全球构造运动的可能性 北京大学五四科学讨论会报告 1978年5月

4)国家地震局震源机制研究小组 中国地震震源机制的研究 第一集 1973年1月

参 考 文 献

- [1] 郭增建等, 从水平力和垂直力的相互作用讨论我国境内地震的孕育, 地球物理学报, 第20卷第3期, 1977年7月。
- [2] 滕吉文等, 华北平原中部地区深部构造背景及邢台地震(二), 地球物理学报, 第18卷第3期, 1975年7月。
- [3] 邓起东等, 关于海城地震震源模式的讨论, 地质科学, 1976年第3期。
- [4] A. E. 夏德格, 地球动力学原理, 科学出版社1977年。
- [5] P. J. Wyllie The Dynamic Earth 1971. (中译本, 朱夏译, 地质出版社, 1978年)
- [6] E. M. Anderson, The Dynamics of Formation of Cone-sheets, Ring-dykes and Caldera-Subsidences, Proceedings of the Royal Society of Edinburgh Vol. LVI, 1935—1936.
- [7] W. J. Phillips, The Dynamic Emplacement of Cone Sheets, Tectonophysics, 24 (1974), 69—84.
- [8] R. D. Mindlin and D. H. Cheng, Thermoelastic stress in the Semi-Infinite Solid, J. Appl. Phys., Vol. 21, PP. 931, 1950.
- [9] 国家地震局地震测量队, 海城7.3级地震的地形变, 地球物理学报, 第20卷第4期, 1977年10月。
- [10] 张祖胜等唐山7.8级地震的地壳垂直形变, 地球物理学报, 第24卷第2期, 1981年4月。
- [11] J. C. Jaeger, Elasticity, Fracture and Flow, 1964.
- [12] 邱群, 1976年7月28日河北省唐山7.8级地震发震背景及其活动性, 地球物理学报, 第19卷第4期, 1976年10月。

THE TRIGGER ACTION OF THE QUICKLY UPLIFTED MANTLE FOR THE SHELOW TECTONIC EARTHQUAKE

Ding Wen-jing
(*Qing Hua University*)

Abstract

A homogeneous dilated sphere in the hemi-infinite elastic space is taken as the mechanical model of the quickly uplifted mantle. With this model the radius and the dilative intensity of the sphere can be computed from the value of the vertical displacement on the earth's surface. The supplementary stress deduced from the uplifted is determined. The computing result shows that the deduced stress on the fault with high inclined angle is tensile, but the shearing stress is also found in the uplifted region of the earth's crust. The amount of these stresses deduced from the quickly uplifted mantle greatly overcomes the stresses deduced from the gravimetric earth-tide, the deviation of the polar axis and the variation of rotational velocity of earth. Consequently, the quickly uplifted mantle has more trigger action than above-mentioned factors for the occurrence of the shallow tectonic earthquake. Owing to the fact that many large earthquakes occurred recently in China have been affected in the uplifted region of earth's crust or in its neighborhood and these earthquake faults have high inclined angle, their occurrence can be explained by the results described in this paper.