

地震与地壳厚度变异带之关系

郑文卿

(兰州地震研究所)

地震是地壳内某些特殊部位的岩石断裂快速传播事件的伴生现象,所谓“特殊部位”系指具备一定构造条件和岩石条件的场所,在一定的地应力场作用下,这种部位能够引起地应力集中及至地应力重复集中,并且存积畸变应变能,因此,研究和勘查现今地应力场作用下那些地应力能够集中的场所,是地震危险区划和地震预测预报的可靠基础。

根据弹性理论的结果推测,地壳厚度变化剧烈和变化复杂的地带(简称变异带)存在着能够引起地应力集中的条件,尤其重要的是,这种地带内常常展布着现代活动构造,在这些构造的端部,底部,拐弯部,及其与其他构造交汇的部位往往出现应力重复集中现象,这就大大加强地应力的活动能力,在岩石条件有利的情况下,这里就容易孕育和发生地震,因而,正如图1所显示的,这种地带也是地震剧烈活动的地带。

目前,欲建立一个确切的统一的中国大地地应力场的概念,看来有困难,因此,为研究方便,我们不妨假设:沿着变异带附近分布着垂直变异带的正应力(张应力或是压应力);或者平行变异带的剪应力;或是两者兼有,见图2所示之,由此,我们分别讨论这些情况下地应力集中的状态。

一、正应力作用下的地应力集中

如果我们把地壳下部物质看成是比较软弱的,那么,可以对横切变异带的剖面作如图3的力学简化,根据弹性理论的结果,在地应力 D_0 和 D_1 的作用下,点 O_1 和点 O_2 附近将出现地应力集中现象,见图4所示,最大正应力 $(D_x)_{m,x}$ 在点 O_1 和 O_2 左边约 $\rho/4$ 的地方出现,且 $\angle F^1 O O_1$ 约为 10° 左右,最大剪应力 $(\tau_{xg})_{m,x}$ 则在点 O_1 和点 O_2 右边约 $\rho/2$ 的地方出现,当 $\theta = \pi/2$ 时,最大正应力集中系数 α 为:

$$\alpha = 1 + \left[\frac{1}{2.8B/b - 2} \cdot \frac{h}{\rho} \right]^{0.80} \quad (1)$$

式中符号见图3所示之,图5描述了地应力集中系数 α 与 B 、 b 和 ρ 的关系,由图可见,变异带两边地壳厚度差异越大,地形变化越大,越有利于地应力集中活动。

当 θ 有任意角,最大正应力集中系数 α_θ 为:

$$\alpha_\theta = 1 + \frac{1 - e^{-0.90\sqrt{B/b}(\pi-\theta)}}{1 - e^{-0.90\sqrt{B/b}\pi/2}} (\alpha - 1) \quad (2)$$

由上式可见, θ 越小,越有利地应力集中,也就是说,在变异带两边地壳厚度差异相同的情况下,变异带越狭,地应力越高度集中,在此带下部, ρ 和 θ 均较地表为大,因此,地应力集中程度应较小。

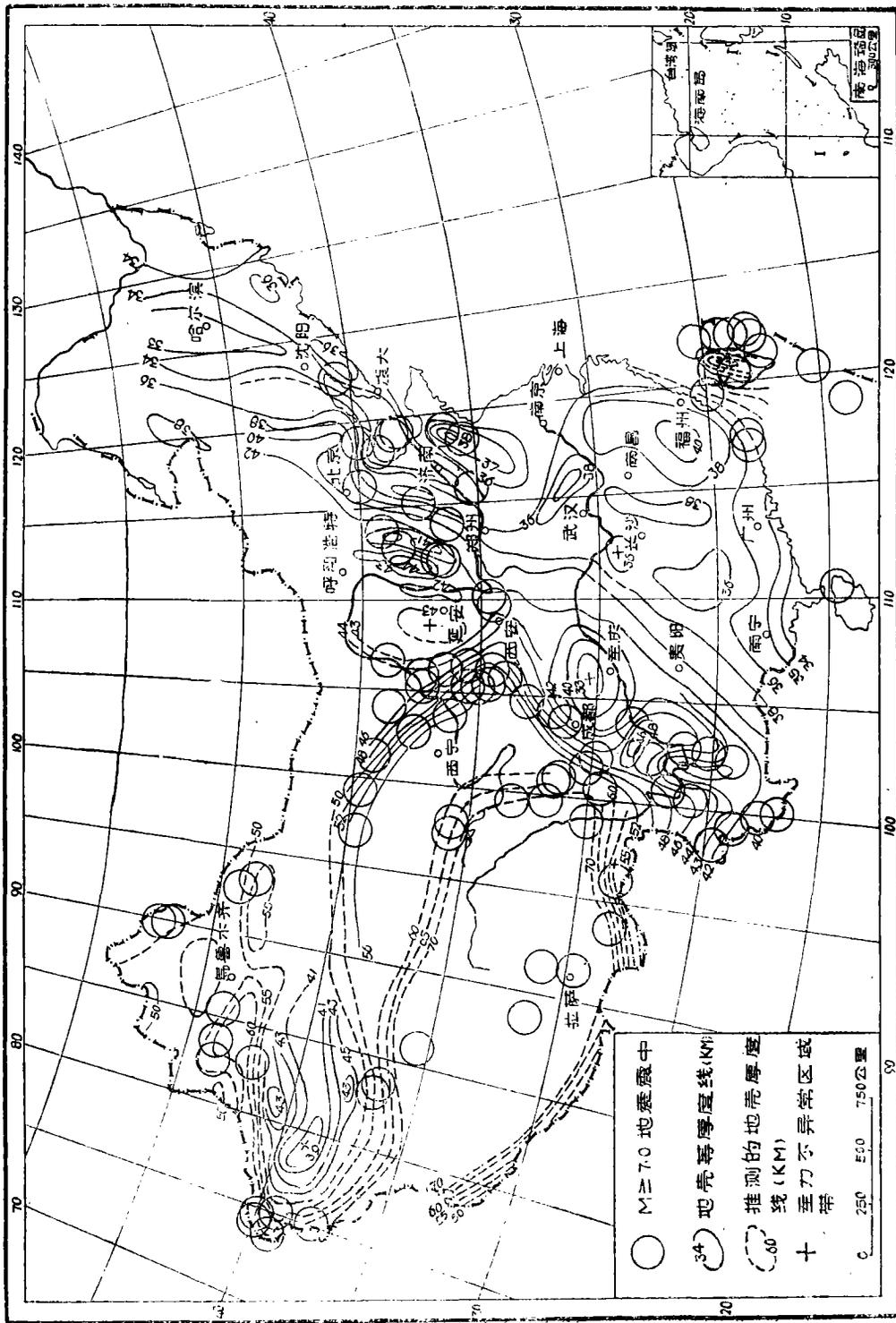


图1 地震与地壳厚度变异带之关系(底图据文献〔1〕)

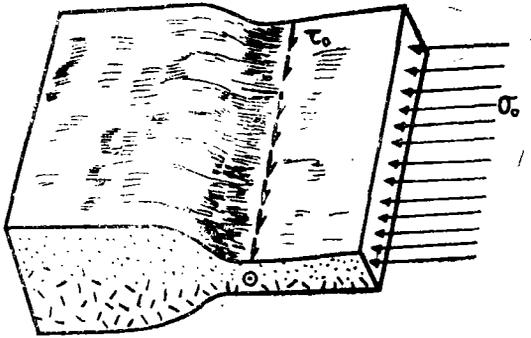


图2 地壳厚度变异带示意图

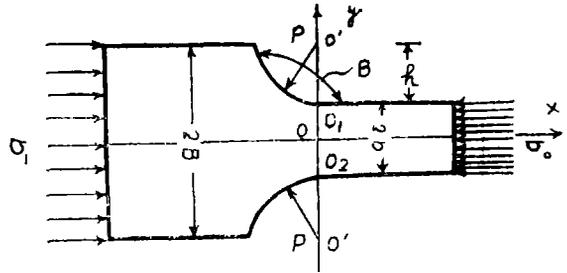


图3 图2横剖面的力学简化

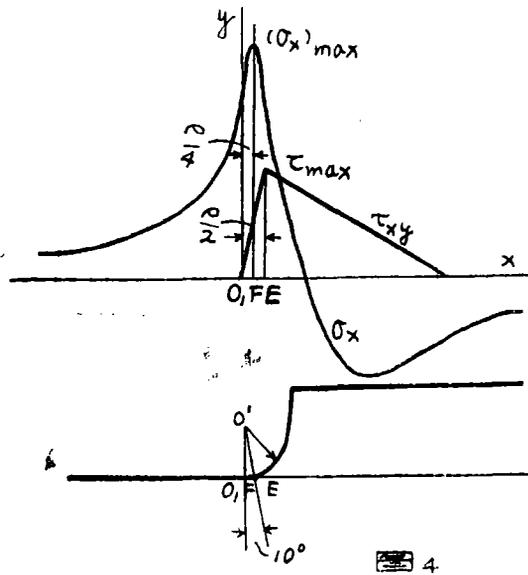


图4

同时，沿变异带展布方向还将出现符号与 σ_0 相同的正应力 σ_x ：

$$\sigma_x = \nu (\sigma_x)_{max} \tag{3}$$

其中， ν 为岩石的泊桑比。

如果在变异带靠地壳较薄的一侧，存在着一条平行变异带的断裂，设其面为半椭圆状，其长轴为 C ，即断裂出露长度的一半；其短轴为 a 、断裂面的倾角为 β ，倾向于地壳厚的一侧、在地应力作用下，断裂的前缘将出现地应力重复集中现象。

所谓“地应力重复集中现象”，系指存在着两个或两个以上地应力集中因素叠加的情况下，地应力益发集中的现象，如图5中的点A处，在应力 σ_0 的作用下将出现应力重复集中现象。这种情况下，应力重复集中系数 α_{II} 是两个应力集中因数单独存在时，应力集中系数的乘积。

$$\alpha_{II} = \alpha_I \times \alpha_{II} \tag{4}$$

在复杂情况下，重复集中系数用下式估计：

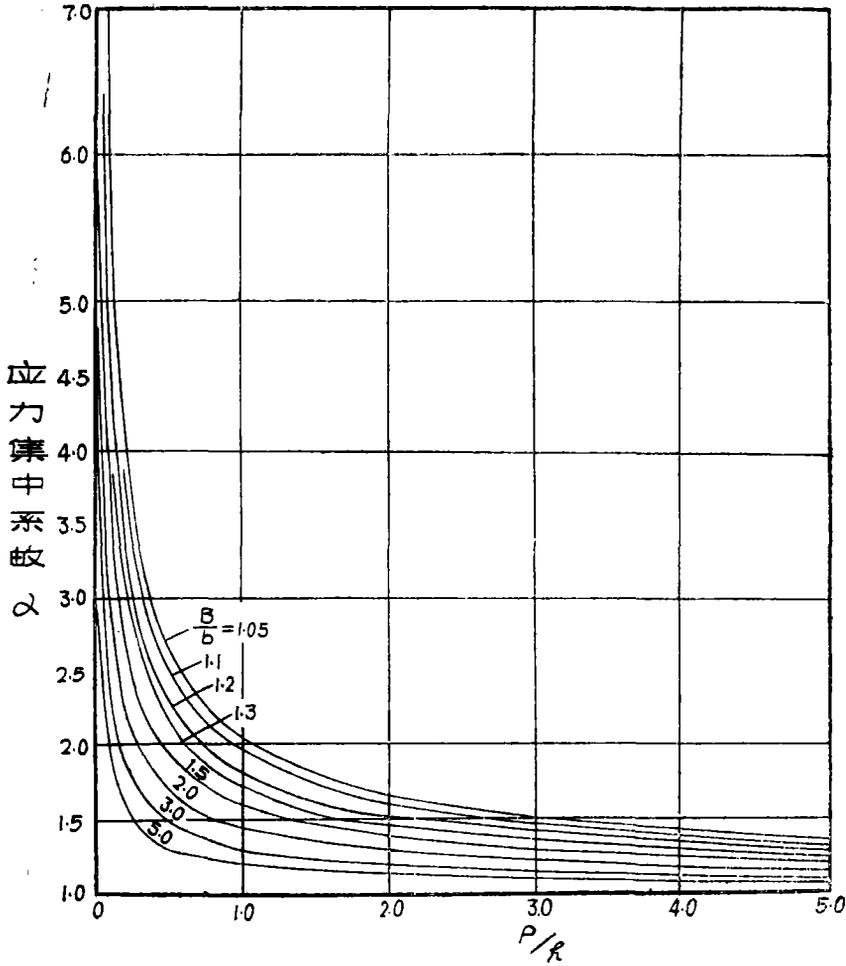


图5 应力集中与B/b、ρ/h的关系

$$\alpha_I + \alpha_{II} - 1.0 < \alpha_{III} < \alpha_I \times \alpha_{II} \quad (5)$$

上述断裂在地壳厚度均匀情况下，受垂直于断裂的地应力 σ_0 作用时，其底部的地应力集中系数 α_β 为：

$$\alpha_\beta = 2 F_1(\beta) E_1(a/2b) \sqrt{\frac{a}{\rho^1}} \quad (\rho^1 \rightarrow 0) \quad (6)$$

其中， ρ^1 为断裂底部曲率半径； $F_1(\beta)$ 为与倾角 β 有关的修正系数，见表1； $E_1(a/2b)$ 为另一个修正系数、 $2b$ 为地壳厚度、在 $a/c \ll 1$ 的条件下， $a/2b \rightarrow 0$ 时， $E_1(0) = 1.121$ ； $a/2b \rightarrow 1$ 时， $E_1(1) = 1.121/(1 - a/2b)^{3/2}$ 。

同时，在断裂底部附近还将出现最大切线应力 $(\sigma_t)_{max}$ ，其方向与断裂面相切；其集中系数 α_t 为：

$$\alpha_t = F_2(\beta) \sqrt{\frac{a}{\rho^1}} \left(1 + \sqrt{\frac{\rho^1}{a}} \right)^2 \quad (\rho^1 \rightarrow 0) \quad (7)$$

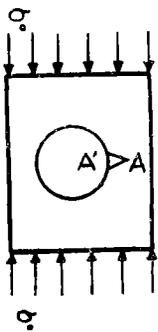


图 6

断裂倾角 β 的修正系数 表 1

β (度)	$F_1(\beta)$	$F_2(\beta)$
15	0.225	0.228
30	0.461	0.337
45	0.705	0.364
60	0.920	0.306
75	1.068	0.174
90	1.121	0

据文献[2]

力 τ_0 的作用下, 点 O_1 和点 O_2 附近发生剪应力集中, 最大应力在点 A_1 和点 A_2 处出现, 且 $\angle A_1 O_1 O_1'$ 和 $\angle A_2 O_2 O_2'$ 约为 $5^\circ \sim 10^\circ$, 剪应力集中系数 α^1 为:

$$\alpha^1 = 1 + K \left(\frac{b}{\rho} \right)^{0.65} \quad (10)$$

其中, K 是与地壳厚度比值有关的系数, 比值越大, K 亦越大、角 θ 对 α^1 亦有影响。

在变异带内存在着前述断裂的情况下, 当剪应力 τ_0 作用时, 仍然会出现地应力重复集中现象。当断裂处于均匀地壳中并受同样剪应力作用时, 断裂的端部附近将出现地应力集中, 最切线张应力集中系数 α_1^1 为:

$$\alpha_1^1 = \sqrt{\frac{C}{\rho^{11}}} \left(1 + \sqrt{\frac{\rho^{11}}{C}} \right)^2 (\rho^{11} \rightarrow 0) \quad (11)$$

其中, ρ^{11} 为断裂端部处的曲率半径、在断裂底部附近则出现剪应力集中, 其集中系数 α^{11} 用下式近似计算:

$$\alpha^{11} = \sqrt{\frac{a}{\rho^1}} \cdot F_3(\beta) \quad (12)$$

其中, $F_3(\beta)$ 为与断裂倾角 β 有关的修正系数。

于是, 断裂端部张应力的重复集中系数 α_{II} 和底部剪应力的重复集中系数 α_{IX} 可用下列式子估计。

$$\alpha^1 + \alpha_1^1 - 1 < \alpha_{II} < \alpha^1 \times \alpha_1^1 \quad (13)$$

$$\alpha^1 + \alpha^{11} - 1 < \alpha_{IX} < \alpha^1 \times \alpha^{11}$$

在静力平衡的前提下, 横截变异带的断裂亦将出现地应力重复集中现象。

三、正应力和剪应力联合作用下的地应力集中

从上述讨论中可知, 地应力集中及重复集中的情形是复杂的。作为定性探讨, 我们对于联合作用下的地应力集中不作详细讨论, 但是, 可以肯定变异带的存在对于地应力在断裂前缘

其中, $F_2(\beta)$ 为与断裂倾角 β 有关的修正系数, 其值见表 1。

那么, 在变异带内平行变异带展布的断裂底部有两个地应力集中部位, 其地应力重复集中系数 α_I 和 α_I^1 可用下式估计。

$$\alpha_0 + \alpha_\beta - 1 < \alpha_I < \alpha_0 \times \alpha_\beta \quad (8)$$

$$\alpha_0 + \alpha_I - 1 < \alpha_I^1 < \alpha_0 \times \alpha_I \quad (9)$$

二、剪应力作用下的地应力集中

同样, 我们对横切变异带的剖面作如图 7 的力学简化, 根据光弹实验结果, 在剪应

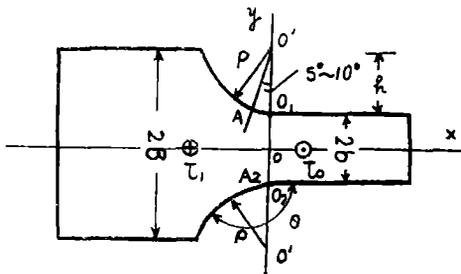


图 7 力学简化示意图

部位,包括端部和底部在内,集中活动起着明显的强化作用。相比之下显然较有利于孕育和发生地震。

以上的讨论,虽然是直接引用弹性理论的近似结果,不可能完全适合于地壳情况。然而,我们还是可以得到定性的结果,这就是:在地应力场条件、构造条件和岩石条件相同的情形下,地壳厚度变异带的存在无疑大大强化了地应力的作用,有利于孕育和发生地震,因而,地壳厚度变异带内,地震发生的频度及强度都较其他地区为显著;正如图1所显示的,变异带对于七级及七级以上强烈地震有着明显的控制作用,这就可以理解了。必须指出,变异带的存在仅仅是较为有利于地应力的集中作用及重复集中作用的条件而已。反过来说,研究变异带对地应力活动的影响应该是重要的课题,不可忽视。

(1)华北地区自东而西有三条地壳厚度变异带,它们分别沿郯庐断裂带、太行山脉和汾渭地堑展布,这三条变异带几乎控制了华北地区强地震的分布

(2)广大的华南地区地壳厚度较为均一,地壳等厚线稀疏均布,那里几乎没有发生七级及七级以上地震,只有福建泉州至广东南澳滨海一带,地壳等厚线较为密集或是转折,那里曾有强烈地震发生。另外,在大别山区地壳较周围地区厚,沿其周围曾发生六~七级地震数次。由此推测,华南地区地震少且强度低与其地壳结构较为简单有内在关联。

(3)台湾地区地壳厚度变化异常剧烈,其西部,即台湾海峡地区地壳较薄,变化较为平缓;中部地壳最厚;而东缘地壳厚度变化最为急剧。众所周知,台湾地区地震的频度和强度都引人注目。而且,这里的地震主要沿台湾岛两测分布,并以其东侧为甚。

(4)东北地区,除其南部滨渤海区域外,地壳等厚线稀疏单调。这里不曾发生大于七级的强地震。

(5)中国西部地区,地壳结构复杂,厚度变化多端。地震,尤其是强烈地震也远较东部地区为多。

青藏高原地壳厚度是世界上最大的,大于七十公里。沿其北缘至东缘展布着一条变异带,此带两测地壳厚度差异相当可观。尤其是青藏高原东北缘,东缘至东南缘。这里是中国东西两部分的界线。从图1可见,沿这一带发生的地震频度和强度亦很可观。此带向北是六盘山、贺兰山,也是变异带,那里地震也成带分布,并与南端地震带共同构成著名的中国南北地震带。青藏高原内部,沿青海高原和藏北高原又是一条变异带,这里地震亦成带分布。

新疆西部、中部及北部地区地壳厚度变化大且复杂,沿这些地区地震活动相当据烈。

(6)世界上强地震的分布亦与地壳厚度变异带有关联,它们大多位于近代造山系的山链侧部和岛弧的濒洋一侧。

(7)值得指出的是,许多地震的发震构造与变异带相平行;也有少数地震的发震构造与变异带斜交。在与变异带斜交的断裂的前缘,仍然会出现地应力重复集中的现象;同时,由于与变异带平行的断裂的运动,将使与变异带斜交的断裂的运动受到阻碍。因此,使后种地震发生在变异带内不同构造的交汇处。

(8)地壳结构的复杂性以及厚度的差异是地质构造活动的结果。同时,在地应力场作用下,展布于变异带内的断裂往往出现地应力重复集中的现象,因而,促使构造活动,使地壳继续差异运动。也就是说,构造运动使地壳结构复杂、厚度差异;而这种结果又反过来强化构造运动。

以上我们从事实上叙述了地壳厚度变异带对于地震分布的控制作用。

必须说明, 我们的讨论仅仅是定性的, 详细讨论看来很有必要。

参 考 文 献

- [1] 罗焕炎, 从大陆地壳动力学观点试论我国地震成因和机制。《地震地质》, 1979.1.
- [2] 西田正孝, 应力集中, 东京: 昭和46年3月, 第二版, 森北出版株式会社出版。
- [3] 冈村弘之, 线形破坏力学入门, 东京: 昭和51年9月30日初版第二刷发行。培风馆出版。
- [4] 中国科学院地球物理研究所编, 中国强地震简目(公元前780年~公元1976年, $M \geq 6$)。北京: 地图出版社出版, 1976年12月第一版。