

逆冲断层地震主震的突变理论分析*

潘岳¹, 赵志刚²

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 山东 青岛 266520;
2. 山东科技大学 矿业灾害预防与控制重点实验室, 山东 青岛 266510)

摘要: 逆冲断层系统作准静态形变时的功、能量增量关系可以分解为关于体积应变能的功能增量关系和关于偏应力能的功能增量关系。采用突变理论方法对逆冲断层系统的偏应力功能增量关系进行的分析表明:折迭突变模型展示的性状可对逆冲断层地震主震的发震条件、演化过程和若干震后特性作恰当描述。围岩的围压大,最大主应力大,逆冲潜断面倾角小,围岩切向刚度与断层抗剪强度曲线软化段拐点处斜率的比值小,则震时围岩弹性能释放大、震级高,断层破裂半错距大,围岩端面位移振幅也大。断层岩体破裂扩容和震时围岩体体积应变能释放,增强了前述效应。

关键词: 逆冲断层; 地震; 折迭突变模型; 弹性能释放大; 断层错距

中图分类号: P315.3 **文献标志码:** A

DOI: 10.3879/j.issn.1000-0887.2012.07.002

引言

突变理论是描述系统参数连续变化导致系统状态不连续变化的非线性理论,地震应力降和震后断层错距都是震时发生的不连续变化现象。断层地震有3种基本形式^[1-2],走滑式、逆冲式和正断层式,还有复合的断层地震形式。文献[3-5]采用突变理论对受纯扭和压扭作用的走滑式断层地震进行了分析。逆冲断层地震的强度大、震级高,危害极其严重。1960年和2010年的智利大地震、2004年印度洋大地震和2011年日本大地震都是逆冲断层地震,逆冲断层地震在海底发生都引起海啸;2008年四川汶川地震南段也是以逆冲运动为主^[6]。对逆冲断层地震特性已有不少现场勘查和统计研究^[6-10],但很少有通过建立数学模型对该类地震特性进行分析的文献。本文拟对简化的逆冲断层地震模型,建立围岩-断层系统的功、能增量关系,采用突变理论对逆冲断层地震主震的孕震、发震、震后过程和有关逆冲断层运动的参数关系进行分析。

1 逆冲断层地震主震的分析模型

1.1 逆冲断层地震主震模型及其分析模型

逆冲断层地震前震和余震通常由断层错动造成,但大震级逆冲断层地震的主震除了原有

* 收稿日期: 2011-07-07; 修订日期: 2012-03-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(5067059)

作者简介: 潘岳(1947—),男,江苏金坛人,教授(联系人, +86-532-86879624; E-mail: panyue@qtech.edu.cn)。

闭锁的断层重新错动造成外,也有一定尺度的完整岩体被剪断、低一层次断层贯通和发展所造成。基于后种主震机制,采用逆冲断层地震的主震模型如图 1,左上和右下有历史上形成的断层带或狭窄破碎带,中间有一定尺度的完整岩体,常称为岩桥。图中完整岩体也可看作未贯通断层间若干岩桥、突出岩体的综合体。最大主应力 σ_1 和沿铅垂方向的最小主应力 σ_3 平行于纸面,中间主应力 σ_2 垂直于纸面。 σ_3 由上覆软岩和海水的重力组成,其中 $\sigma_1 \gg \sigma_3$ 。在 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 共同作用下,原断层端部有所延伸,上下原断层一般不在一个平面上,由岩石材料的塑性变形集中效应,当完整岩体被剪断时,破裂区将是沿原断层端点连线的狭窄区域。本文主震发生前称其为潜断层带,震后称为新生断层带。如此岩桥被剪断,低一层次的断层带贯通,整个右方围岩沿断层面剧烈上冲,逆冲地震发生,海底巨大尺度岩体的剧烈上冲必引发海啸。

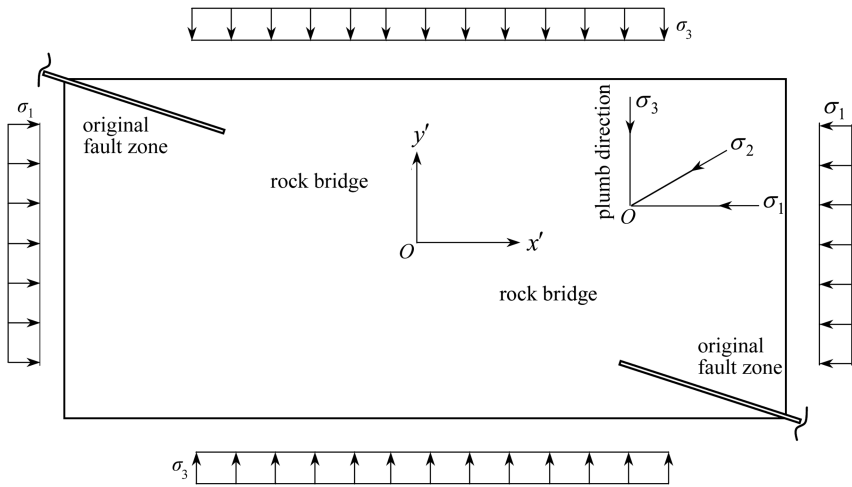


图 1 逆冲断层地震主震模型剖面图

Fig. 1 Profile chart of main shock model of thrust fault earthquake

由于问题复杂,为简化分析,假定在很大的空间尺度范围内 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 不变,在图 1 中离原断层两侧有足够远的远场取一对平行截面,垂直于原断层面取另一对平行截面,可得到逆冲断层地震主震的分析模型(见图 2(a)),图中宽为 $2l$ 的虚线部分为放大的潜断层带,潜断层面与最大主应力 σ_1 的夹角 $\psi < 45^\circ$ ($\xi = 90^\circ - \psi > 45^\circ$)。图 2(a)中两对平行截面上的正应力 σ_x, σ_y 和切应力 $\tau_{xy} = \tau_{yx} = \tau$,可根据沿断层面倾角为 ψ 的单元体(见图 3)和应力转轴公式,用主应力 σ_1, σ_3 写出为

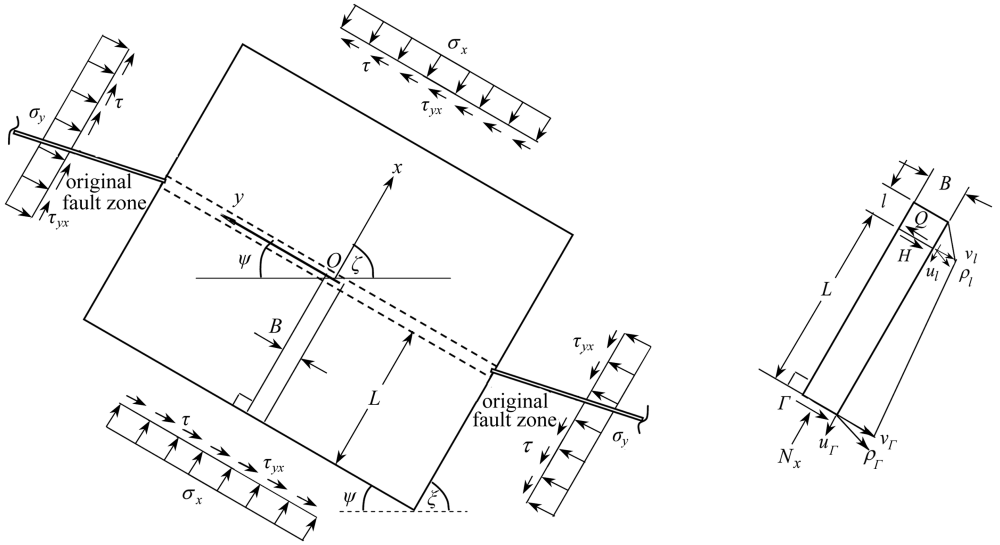
$$\sigma_x = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\xi = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\psi, \tag{1}$$

$$\sigma_y = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos(180^\circ + 2\xi) = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\psi, \tag{2}$$

$$\begin{aligned} \tau_{xy} &= \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\xi = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin(180^\circ - 2\psi) = \\ &= \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\psi \quad (> 0, \text{逆时针}), \end{aligned} \tag{3}$$

$$\tau_{yx} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin(180^\circ + 2\xi) = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin(360^\circ - 2\psi) =$$

$$-\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\psi \quad (< 0, \text{顺时针}). \quad (4)$$



(a) 逆冲断层地震主震的分析模型

(b) 半条带模型

(a) Analysis model of main shock of thrust fault earthquake

(b) Half strip model

图2 模型图

Fig.2 Model

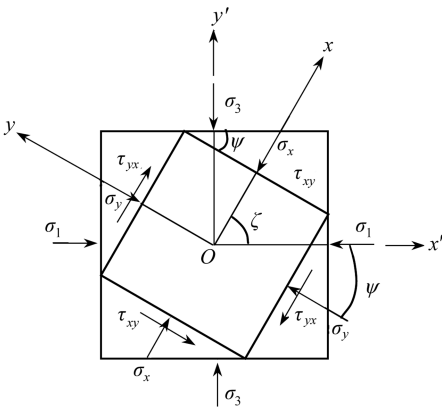


图3 沿潜断层面的应力状态

Fig.3 Stress state of potential fault

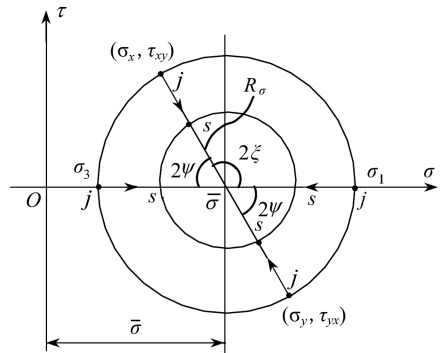


图4 围岩和潜断层带中应力变化方式

Fig.4 Variation way of stress in surrounding rock and potential fault zone

1.2 围岩、潜断层带中的应力变化方式和应力分解

由于 $\psi < 45^\circ$, 比较式(1)和式(2)可知 $\sigma_y > \sigma_x$. 式(3)表明 $\tau_{xy} > 0$, τ_{xy} 的正方向为逆时针, 这是因为与材料力学不同, 岩体力学中规定压应力为正, 相应切应力以逆时针为正.

由式(2)减式(1)得

$$\frac{\sigma_y - \sigma_x}{2} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\psi, \quad (5)$$

注意到 $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ 的值是图4中应力圆半径 R_σ , 由式(5), $\tau_{xy} > 0$ 和 $\tau_{yx} < 0$ 知, 2ψ 和 $2\xi = 180^\circ - 2\psi$ 分别为图4中 $j-j$ 斜线与水平轴的夹角. 由图4应力圆还可以看到, 应力变化时 τ_{xy}, τ_{yx}

与 j - j 斜线水平投影的一半 $(\sigma_y - \sigma_x)/2 (> 0)$ 之间始终有关系式

$$\frac{\sigma_y - \sigma_x}{2} / \tau_{xy} = \frac{\sigma_y - \sigma_x}{2} / |\tau_{yx}| = \cot 2\psi, \quad (6)$$

即应力沿 j - j 斜线变化。如若孕震期、发震和震后,主应力 σ_1, σ_3 变化使得图 4 中圆心位置 $\bar{\sigma} = (\sigma_1 + \sigma_3)/2 = (\sigma_x + \sigma_y)/2$ 有所减小,但只要图 1 中的主应力方向不变,潜断层层面倾角 ψ 不变,应力便沿图 4 应力圆中的 j - j 斜线变化。

应力张量 σ_{ij} 可用对应剪切畸变的应力偏张量 s_{ij} 和对应体积应变的应力球张量 σ_m 表示为

$$\sigma_{ij} = s_{ij} + \delta_{ij}\sigma_m,$$

其中

$$\sigma_x = s_x + \sigma_m, \quad \sigma_y = s_y + \sigma_m, \quad s_{xy} = \tau_{xy}. \quad (7)$$

将式(3)代入式(1)和式(2),再由式(7),可将围岩、断层中的应力分解为用围压 $\bar{\sigma} = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$, 偏应力 $s_{xy} = \tau_{xy}$ 和 ψ 角表示,即

$$\sigma_x = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\psi = \bar{\sigma} - \tau_{xy} \cot 2\psi = \bar{\sigma} - s_{xy} \cot 2\psi, \quad (8)$$

$$\sigma_y = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\psi = \bar{\sigma} + \tau_{xy} \cot 2\psi = \bar{\sigma} + s_{xy} \cot 2\psi. \quad (9)$$

1.3 围岩、潜断层带的应变变化方式和应变分解

围岩处在弹性状态。由广义 Hooke 定律可得图 2 围岩中的应变

$$\varepsilon_{xL} = \frac{1}{E} [\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)], \quad \varepsilon_{yL} = \frac{1}{E} [\sigma_y - \mu(\sigma_z + \sigma_x)],$$

$$\varepsilon_{Ly} - \varepsilon_{Lx} = \frac{1 + \mu}{E} (\sigma_y - \sigma_x) = \frac{1}{2G} (\sigma_y - \sigma_x).$$

由于 $\sigma_y > \sigma_x$, 围岩介质应变圆图 5 中 $\varepsilon_{Ly} > \varepsilon_{Lx}$ 。在上式两端除以 $\gamma_L = \tau_{xy}/G$, 再利用式(6)可得

$$\frac{\varepsilon_{Ly} - \varepsilon_{Lx}}{2} / \frac{\gamma_L}{2} = \frac{\sigma_y - \sigma_x}{2} / \tau_{xy} = \cot 2\psi, \quad (10)$$

式(10)表明围岩介质的应变沿图 5 应变圆中的 j - j 斜线变化。

假定潜断层带介质应变沿应变圆中 $2\psi'$ 斜线变化,即

$$\frac{\varepsilon_{ly} - \varepsilon_{lx}}{2} / \frac{\gamma_l}{2} = \cot 2\psi'. \quad (11)$$

按增量理论,处于塑性畸变阶段的潜断层带介质的应变增量与应力偏量的关系^[11]为

$$\begin{cases} \delta\varepsilon_{lx} = \delta\varepsilon_{lm} + s_x\delta\lambda, & \delta\varepsilon_{ly} = \delta\varepsilon_{lm} + s_y\delta\lambda, \\ \delta\varepsilon_{lxy} = \delta(\gamma_l/2) = s_{xy}\delta\lambda = \tau_{xy}\delta\lambda, \end{cases} \quad (12)$$

式中, ε_{lm} 为平均应变, $\delta\lambda$ 为正的比例系数,在加载过程中它可能是个变量。由式(7)和式(12),可得

$$\sigma_y - \sigma_x = s_y - s_x, \quad \delta\varepsilon_{ly} - \delta\varepsilon_{lx} = (s_y - s_x)\delta\lambda, \quad \tau_{xy}/(\delta(\gamma/2)) = 1/(\delta\lambda).$$

再由式(6)和式(11),可得

$$\begin{aligned} \frac{\cot 2\psi}{\cot 2\psi'} &= \frac{(\sigma_y - \sigma_x)/2}{\tau_{xy}} / \frac{(\delta\varepsilon_{ly} - \delta\varepsilon_{lx})/2}{\delta(\gamma_l/2)} = \\ &= \frac{\sigma_x - \sigma_y}{\delta\varepsilon_{ly} - \delta\varepsilon_{lx}} / \frac{\tau_{xy}}{\delta(\gamma_l/2)} = \frac{s_y - s_x}{s_y - s_x} = 1, \quad \text{或 } \psi' = \psi, \end{aligned} \quad (13)$$

此后就用 ψ 来表示 ψ' 。由于震时潜断层破裂形变骤增,再由式(11)和式(13),可知潜断层带介质的应变沿图6应变圆中的 j - j 斜线变化。

沿 z 轴(即 σ_2) 方向按平面应变处理, $\varepsilon_z = \varepsilon_2 = 0$, 从而可写出 $\varepsilon_y, \varepsilon_x$ 或 $\varepsilon_1, \varepsilon_3$ 与体积应变 θ , 平均应变 ε_m 的关系为

$$\varepsilon_x + \varepsilon_y = \theta = 3\varepsilon_m = \varepsilon_3 + \varepsilon_1. \quad (14)$$

为下文运算需要,用体积应变 θ 将 $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ 表示为

$$\varepsilon_y = \frac{\theta}{2} + \frac{\varepsilon_y - \varepsilon_x}{2}, \quad \varepsilon_x = \frac{\theta}{2} - \frac{\varepsilon_y - \varepsilon_x}{2}. \quad (15)$$

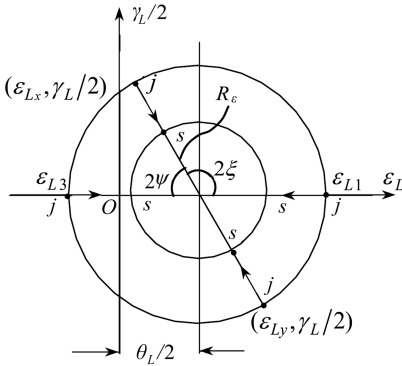


图5 围岩介质的应变变化方式

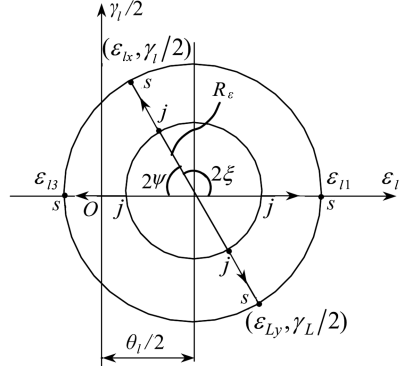


图6 潜断层带介质的应变变化方式

Fig. 5 Variation way of strain of surrounding rock

Fig. 6 Variation way of strain of potential fault zone

对应于式(8)和式(9),参照式(15),再由图5和图6,可将围岩、断层介质的应变分解为用体积应变 θ , 偏应变 $e_{xy} = \gamma_{xy}/2 = \gamma/2$ 和 ψ 角表示,即

$$\begin{cases} \varepsilon_{Ly} = \frac{\theta_L}{2} + \frac{\gamma_L}{2} \cot 2\psi = \frac{\theta_L}{2} + e_{Lxy} \cot 2\psi, \\ \varepsilon_{Lx} = \frac{\theta_L}{2} - \frac{\gamma_L}{2} \cot 2\psi = \frac{\theta_L}{2} - e_{Lxy} \cot 2\psi, \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} \varepsilon_{ly} = \frac{\theta_l}{2} + \frac{\gamma_l}{2} \cot 2\psi = \frac{\theta_l}{2} + e_{lxy} \cot 2\psi, \\ \varepsilon_{lx} = \frac{\theta_l}{2} - \frac{\gamma_l}{2} \cot 2\psi = \frac{\theta_l}{2} - e_{lxy} \cot 2\psi. \end{cases} \quad (17)$$

2 逆冲断层地震主震的半条带模型

对于图2中的 Oxy 坐标系,结构和正应力关于坐标轴对称,而切应力 $\tau_{xy} = \tau_{yx} = \tau$ 和相应岩体切应变 $\gamma_{xy} = \gamma_{yx} = \gamma$ 关于坐标轴反对称,故可从三维大地块中取出一长、宽、厚分别为 $L+l, B, D$ 的半条带(见图2(b))来进行分析,由于该半条带是图2大地块中任一半条带,故大地块动力失稳,半条带也动力失稳。反之,半条带动力失稳,大地块也动力失稳。 $L+l$ 中的 l 为潜断层带的半宽度, L 为此潜断层带外侧到左下方远场间的距离。

对于图2(b)中的半条带,在 $x = -l$ 处应力应满足连续条件

$$\tau_l BD = \tau_l BD \text{ 或 } Q = H, \quad (18)$$

$$\sigma_{lx} BD = \sigma_{lx} BD = N_x. \quad (19)$$

在 $x = -(l+L)$ 处的力边界条件为

$$\tau_L BD = \tau BD = \Gamma, \sigma_{Lx} BD = \sigma_{Lx} BD = N_x \quad (20)$$

围岩处于弹性阶段,其切应力-切应变关系为

$$\tau = G\gamma_L, \quad (21)$$

式中 G 为剪切弹模,产生塑性变形的潜断层带介质强度相对较弱,由 Karcinovic 的文献 [12],其切应力-切应变全曲线关系可写为

$$\tau = g\gamma_l \exp\left[-\left(\frac{\gamma_l}{\gamma_{l0}}\right)^m\right], \quad (22)$$

式中, g 为介质的初始剪切刚度, γ_{l0} 为潜断层带介质微元的平均剪切强度, m 为介质微元均质度参数, m 越大,曲线软化段越陡. 峰值强度 τ_{\max} 处的应变 γ_{lc} 与 γ_{l0} 的关系为

$$\gamma_{lc} = \left(\frac{1}{m}\right)^{1/m} \gamma_{l0}, \quad (23)$$

$m = 1$ 时, $\gamma_{l0} = \gamma_{lc}$. 按 Coulomb-Mohr 强度准则,式(22)中的 γ_{l0} 和切应力峰值强度 τ_{\max} 随围压 $(\sigma_1 + \sigma_3)/2$ 的增大而增大,具体数据可从试验获得.

图 2 半条带 $x = -l$ 处的切向和纵向位移为 v_l, u_l , 总位移 $\rho_l = \sqrt{u_l^2 + v_l^2}$; 半条带 $x = -(l+L)$ 处的切向和纵向位移为 v_L, u_L , 总位移 $\rho_L = \sqrt{u_L^2 + v_L^2}$. 在均布应力作用下断层和围岩应变各自相同,位移按线性分布. 断层切应变 γ_l 与 $x = -l$ 处切向位移 v_l 的关系为

$$\gamma_l = \frac{v_l}{l}. \quad (24)$$

围岩切应变 γ_L 与围岩切向形变 v_L 及 v_l, v_r 的关系为

$$\gamma_L = \frac{v_r - v_l}{L} = \frac{v_L}{L}. \quad (25)$$

将式(22)和式(24)代入式(18),可得围压下断层半条带 $x = -l$ 截面处的剪力 $Q(v_l)$ 与切向形变 v_l 的关系为

$$Q(v_l) = \frac{gBD}{l} v_l \exp\left[-\left(\frac{v_l}{v_{l0}}\right)^m\right] = \lambda v_l \exp\left[-\left(\frac{v_l}{v_{l0}}\right)^m\right], \quad (26)$$

式中已记 $\lambda = gBD/l$. 将式(21)和式(25)代入式(20),可得围岩半条带的剪力 $\Gamma = H$ 与切向形变 v_L 的关系

$$\Gamma = H = \frac{GBD}{L} v_L = k_L v_L, \quad (27)$$

式中 $k_L = GBD/L$ 为半条带围岩部分的切向刚度.

式(26)的图形为图 7 纵轴右侧峰后软化段上具有拐点 t 的曲线,式(27)的图形为图 7 纵轴左侧斜率为 $\tan \eta = GBD/L$ 的直线段 On 部分.

图 2(b) 中半条带外边界剪力 Γ 作用点位移 ρ_r 按准静态单调方式增大,即可设 $d\rho_r/dt = c_1, c_1$ 为微小常数.

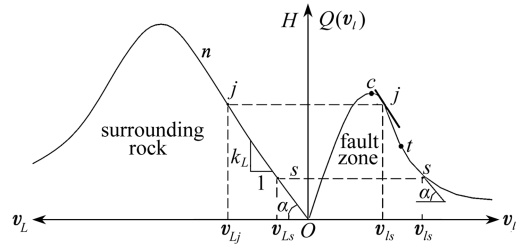


图 7 围岩,潜断层半条带的剪力-横向位移关系
Fig. 7 Relationship between shear and lateral displacement in half strip of surrounding rock and potential fault zone

3 半条带准静态形变的能量分析与分解

为便于考察,将图 2(b) 顺时针旋转 $90^\circ - \psi$ 得到水平放置的半条带系统(见图 8)。图 2(b) 与图 8 中半条带边缘的应力 τ, σ_y 和合力 Γ, N_x 是系统外力,外力做功使半条带发生形变和能量变化。将半条带的能量变化记为 δU , 相应外力功增量记为 δW 。在潜断层带动力破裂之前,半条带作准静态形变,无动能影响,据能量守恒原理可写出围岩-潜断层半条带的功-能量增量关系为

$$\delta U - \delta W = 0. \quad (28)$$

由式(7)至式(9)和式(16)和式(17),可写出半条带的能量变化:

$$\begin{aligned} \delta U &= \delta U_L^e + \delta U_l^p = \\ &BDL[\sigma_y \delta \varepsilon_{Ly} + \sigma_x \delta \varepsilon_{Lx} + \tau \delta \gamma_L] + \\ &BDl[\sigma_y \delta \varepsilon_{ly} + \sigma_x \delta \varepsilon_{lx} + \tau \delta \gamma_l] = \\ &BDL\left[(\bar{\sigma} + \tau \cot 2\psi) \delta\left(\frac{\theta_L}{2} + \frac{\gamma_L}{2} \cot 2\psi\right) + \right. \\ &(\bar{\sigma} - \tau \cot 2\psi) \delta\left(\frac{\theta_L}{2} - \frac{\gamma_L}{2} \cot 2\psi\right) + \tau \delta \gamma_L \left. \right] + \\ &BDl\left[(\bar{\sigma} + \tau \cot 2\psi) \delta\left(\frac{\theta_l}{2} + \frac{\gamma_l}{2} \cot 2\psi\right) + \right. \\ &(\bar{\sigma} - \tau \cot 2\psi) \delta\left(\frac{\theta_l}{2} - \frac{\gamma_l}{2} \cot 2\psi\right) + \tau \delta \gamma_l \left. \right] = \\ &BDL\delta\bar{\sigma}\theta_L + BDl\bar{\sigma}\delta\theta + BD[L\tau\delta\gamma_L(\cot^2 2\psi + 1) + l\tau\delta\gamma_l(\cot^2 2\psi + 1)] = \\ &BDL\bar{\sigma}\delta\theta_L + BDl\bar{\sigma}\delta\theta_l + H\delta v_L \csc^2 2\psi + Q\delta v_l \csc^2 2\psi = \\ &\delta U_v + [\delta U_{L,d}^e + \delta U_{l,d}^p], \end{aligned} \quad (29)$$

以上运算已利用式(18), $Q = \tau BD, H = \tau BD$, 式(24)中, $v_l = \gamma_l l$ 和式(25)中 $v_L = \gamma_L L$ 。式(29)中的

$$\delta U_v = BDL\bar{\sigma}\delta\theta_L + BDl\bar{\sigma}\delta\theta_l \quad (30)$$

为半条带的体积应变能变化;式(29)等号右端方括号中的两项

$$\delta U_{L,d}^e = H\delta v_L \csc^2 2\psi, \quad \delta U_{l,d}^p = Q\delta v_l \csc^2 2\psi \quad (31)$$

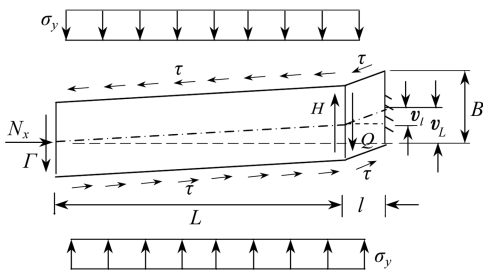


图 8 右旋 $90^\circ - \psi$ 角度后的围岩-潜断层半条带

Fig. 8 Surrounding rock-potential fault zone half strip after rotating $90^\circ - \psi$ right-handed

为围岩、潜断层带的偏应力能变化。

半条带上外力功增量为

$$\delta W = \delta W_1 + \delta W_2, \quad (32)$$

其中 δW_1 为图 8 半条带表面剪力 Γ 和切应力 $\tau_{yx} = \tau$ 的外力功增量。远场边界 $x = -(l + L)$ 处剪力功增量为 $\Gamma \delta v_r$; 上下表面的切应力 $\tau_{yx} = \tau$ 在半条带微形变上的外力功为高阶微量,予以忽略。因此

$$\delta W_1 = BD\tau\delta v_r = \Gamma\delta v_r, \quad (33)$$

δW_2 为图 8 中半条带表面压力 N_x 和正应力 σ_y 的外力功增量。 N_x 在半条带纵向微位移上的外力功

增量为 $N_x \delta(L + l) = BD\sigma_x(L\delta\varepsilon_{Lx} + l\delta\varepsilon_{lx})$; 上下表面正应力 σ_y 在半条带横向微形变引起的微位移上的外力功增量为

$$DL\sigma_y \delta B + Dl\sigma_y \delta B = DL\sigma_y (B\delta\varepsilon_{ly}) + Dl\sigma_y (B\delta\varepsilon_{ly}) .$$

将这两部分功相加,再利用式(8)和式(9)与式(16)和式(17)后可得

$$\begin{aligned} \delta W_2 &= BDL(\sigma_x \delta\varepsilon_{lx} + \sigma_y \delta\varepsilon_{ly}) + BDL(\sigma_x \delta\varepsilon_{lx} + \sigma_y \delta\varepsilon_{ly}) = \\ & BDL \left[(\bar{\sigma} - \tau_{xy} \cot 2\psi) \delta \left(\frac{\theta_L}{2} - \frac{\gamma_L}{2} \cot 2\psi \right) + \right. \\ & \left. (\bar{\sigma} + \tau_{xy} \cot 2\psi) \delta \left(\frac{\theta_L}{2} + \frac{\gamma_L}{2} \cot 2\psi \right) \right] + \\ & BDL \left[(\bar{\sigma} - \tau_{xy} \cot 2\psi) \delta \left(\frac{\theta_l}{2} - \frac{\gamma_l}{2} \cot 2\psi \right) + \right. \\ & \left. (\bar{\sigma} + \tau_{xy} \cot 2\psi) \delta \left(\frac{\theta_l}{2} + \frac{\gamma_l}{2} \cot 2\psi \right) \right] = \\ & BDL[\bar{\sigma} \delta\theta_L + \tau_{xy} \delta\gamma_L \cot^2 2\psi] + BDL[\bar{\sigma} \delta\theta_l + \tau_{xy} \delta\gamma_l \cot^2 2\psi] = \\ & [BDL\bar{\sigma} \delta\theta_L + BDL\bar{\sigma} \delta\theta_l] + \Gamma[\delta v_l + \delta v_L] \cot^2 2\psi . \end{aligned} \quad (34)$$

以上运算已利用式(18)和式(20)与式(24)和式(25).将式(33)和式(34)代入式(32),再由式(25), $v_r - v_l = v_L$ 可得

$$\delta W = [BDL\bar{\sigma} \delta\theta_L + BDL\bar{\sigma} \delta\theta_l] + \Gamma \delta v_r \csc^2 2\psi . \quad (35)$$

式(35)表明,半条带上外力功增量 δW 可以分解为相应体积应变能变化的功增量 δW_v 和相应偏应力能变化的功增量 δW_d , 其中

$$\delta W_v = BDL\bar{\sigma} \delta\theta_L + BDL\bar{\sigma} \delta\theta_l, \quad \delta W_d = \Gamma \delta v_r \csc^2 2\psi . \quad (36)$$

将式(29)和式(35)代入式(28)后,可以得到图8中半条带系统作准静态形变时的两个功、能量增量平衡关系:

$$\delta U_v - \delta W_v = 0, \quad (37)$$

$$\delta U_{L,d}^e + \delta U_{ld}^p - \delta W_d = 0. \quad (38)$$

偏应力控制材料塑性形变与破裂,以下主要通过式(38)来对潜断层带失稳破裂进行研究.式(38)的物理意义可以参照图2、图7叙述为:围岩-潜断层带承受复杂应力.潜断层带失稳破裂是在其峰值强度之后的软化阶段发生的,在潜断层带峰后(类似图7Q(v_l)曲线峰后)软化阶段,潜断层带有准静态形变增量 $\delta\rho_l (> 0)$ 时,其内微裂纹扩展、连通要吸收能量 $\delta U_{ld}^p (> 0)$;相应围岩由于卸载(与沿图7沿On段卸载类似),其形变增量 $\delta(\rho_r - \rho_l) < 0$,即要释放弹性形变能 $\delta U_{L,d}^e (< 0)$.当 $-\delta U_{L,d}^e < \delta U_{ld}^p$ 时,外力 Γ, N_x, τ 和 σ_y 在其位移上做功 $\delta W_d (> 0)$ 补充能量,才能使潜断层带产生形变 $\delta\rho_l (> 0)$.由于是处于准静态,据能量守恒原理,三者满足关系式(38).故式(38)为以潜断层带任一形变 ρ_l 时的状态为参考态建立的,断层带有微形变 $\delta\rho_l (> 0)$,而系统作准静态形变时的功、能量增量平衡关系——势函数的微分形式.

4 逆冲断层地震主震的折迭突变模型

将式(31)和式(36)的第1式代入式(38),可得图8中,潜断层带 $x = -l$ 处,切向位移增量 $\delta v_l > 0$ 时半条带系统的功、能量增量平衡关系:

$$(H\delta v_L + Q\delta v_l - \Gamma\delta v_r) \csc^2 2\psi = 0, \quad (39)$$

由于 $0 < \psi < 45^\circ, 1 < \csc^2 2\psi < c_2, c_2$ 为某正常数.式(39)两端除以 δv_l ,再由式(18)和式(27),并考虑到 k_L 为常数导得的 $H\delta v_L / (\delta v_l) = Q(v_l) \cdot Q'(v_l) / k_L$,可以从该式得到用潜断层带切向位移 v_l 表示的半条带作准静态形变时平衡方程

$$Q(v_l) \frac{Q'(v_l)}{k_L} + Q(v_l) - J = 0, \quad (40)$$

式中已记

$$J = \Gamma \frac{\delta v_r}{\delta v_l}, \quad (41)$$

J 为使潜断层带产生单位形变 $\delta v_l (> 0)$ 时, 远场边界 $x = -(L + l)$ 处剪力 Γ 做功对围岩 - 潜断层带系统输入的能量; 而 $\csc^2 2\psi \cdot J$ 为使潜断层带产生单位形变 $\delta \rho_l (> 0)$ 时, 半条带表面全部外力做功对围岩 - 潜断层带系统输入的能量. 从导得式(40)的过程知, 若式(40)中 $J > 0$, 潜断层带作准静态形变; 若式(40)中 $J = 0$, 则表明无需外力做功, 仅凭系统内部的能量转移, 潜断层带形变便自动加大, 这表明系统处于临界状态. 故可用

$$J = 0 \quad (42)$$

作为判定围岩-潜断层带系统失去准静态或逆冲断层地震主震发生的临界条件.

由图7中 $Q(v_l)$ 曲线软化段上拐点 t 处的形变 v_{lt} 满足方程 $Q''(v_{lt}) = 0$ 的条件, 可得 t 点处形变 v_{lt} 与 v_{lo} 之间的关系为

$$\frac{v_{lt}}{v_{lo}} = \left(\frac{1+m}{m} \right)^{1/m}. \quad (43)$$

曲线软化段拐点 t 处的斜率最陡, 潜断层带失稳破裂(动力破裂)是发生在其 $Q(v_l)$ 曲线软化段拐点上下的系统行为, 利用式(43)可得式(26)在 v_{lt} 处的各阶导数:

$$\begin{cases} Q(v_{lt}) = \eta v_{lt}, & Q'(v_{lt}) = -\eta m, \\ Q''(v_{lt}) = 0, & Q'''(v_{lt}) = \frac{\eta}{v_{lt}^2} m(1+m)^2, \end{cases} \quad (44)$$

式中

$$\eta = \lambda \exp \left[-\frac{1+m}{m} \right] = \frac{gBD}{l} \exp \left[-\frac{1+m}{m} \right]. \quad (45)$$

利用式(44), 将式(40)中的 $Q(v_l)$ 和 $Q'(v_l)$ 在 v_{lt} 处作 Taylor 展开后可得

$$\begin{aligned} & \frac{\eta^2 m (1+m)^2}{2v_{lt}} (v_l - v_{lt})^2 + \eta^2 m^2 \left(1 - \frac{k_L}{\eta m} \right) (v_l - v_{lt}) + \\ & \eta^2 m v_{lt} \left(\frac{k_L}{\eta m} - 1 \right) - J + O(v_l - v_{lt})^3 = 0, \end{aligned} \quad (46)$$

记

$$K = \frac{k_L}{\eta m} = \frac{Gl}{gLm} \exp \left(\frac{1+m}{m} \right), \quad (47)$$

K 为围岩刚度 k_L 与 $|Q'(v_{lt})| = \eta m$ 的比值, 为重要系统参数. 以下讨论 $K < 1$ 即主震发生的情况, 这样 $(v_l - v_{lt})^2$ 项是级数(46)中系数不为0的最低项次. 由突变理论中的确定性法则^[13], 式(46)对应的是折迭突变模型的平衡方程, 故可略去 $(v_l - v_{lt})^3$ 以上的项来讨论围岩-潜断层半条带的稳定性. 利用式(47), 可将式(46)整理为无量纲形式

$$\begin{aligned} & \left[\frac{v_l - v_{lt}}{v_{lt}} + \frac{m}{(1+m)^2} (1-K) \right]^2 - \frac{m^2}{(1+m)^4} (1-K)^2 - \\ & \frac{2(1-K)}{(1+m)^2} - \frac{2KJ}{Q(v_{lt})(1+m)^2} = 0, \end{aligned} \quad (48)$$

作变量代换

$$\begin{cases} w = \frac{v - v_l}{v_l} + \frac{m}{(1+m)^2}(1-K), \\ a = -\frac{m^2}{(1+m)^4}(1-K)^2 - \frac{2(1-K)}{(1+m)^2} - \frac{2KJ}{Q(v_l)(1+m)^2}. \end{cases} \quad (49)$$

可将式(48)化成折迭突变模型平衡方程的正则形式

$$w^2 + a = 0, \quad (50)$$

式中, w 是状态变量, a 是控制变量. 式(50)的图形为一抛物线, $a = 0$ (或 $K - 1$ 轴) 将抛物线分成上、下两枝, 如图 9.

注意到 $\delta v_r = \delta v_L + \delta v_l$, 由式(18)、(27), 潜断层带失稳的临界条件式(42)可以表示为

$$J = \Gamma \frac{\delta v_r}{\delta v_l} = \Gamma \frac{Q'(v_l) + k_L}{k_L}. \quad (51)$$

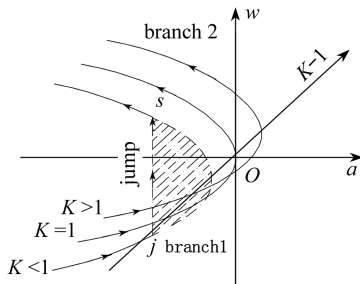


图 9 折迭突变模型的平衡曲面

Fig. 9 Equilibrium surface of fold catastrophe

图 7 中 $Q(v)$ 曲线软化段上 v_l 增大时, 斜率 $Q'(v_l)$

从 $Q'(v_{lc}) = 0$ 值起负向增大, 在拐点处达到负极值 $Q'(v_{li})$. 拐点以下 $Q'(v_{li})$ 由负极值向 0 变化, 故在 $Q(v_l)$ 曲线软化段某些区段上, 式(51)中能量输入率 J 为正值. 在这样的区段上, 式(48)可写为两个式子:

$$\begin{aligned} \frac{v_l - v_{li}}{v_{li}} + \frac{m}{(1+m)^2}(1-K) = w_1 = \\ \frac{-1}{(1+m)} \sqrt{\frac{m^2}{(1+m)^2}(1-K)^2 + 2(1-K) + \frac{2KJ}{Q(v_{li})}}, \end{aligned} \quad (52)$$

$$\begin{aligned} \frac{v_l - v_{li}}{v_{li}} + \frac{m}{(1+m)^2}(1-K) = w_2 = \\ \frac{1}{(1+m)} \sqrt{\frac{m^2}{(1+m)^2}(1-K)^2 + 2(1-K) + \frac{2KJ}{Q(v_{li})}}. \end{aligned} \quad (53)$$

图 9 中, 式(52)和式(53)是围岩-潜断层带系统准静态平衡路径的下、上两个分枝, 它们分别对应于图 7 $Q(v_l)$ 曲线峰后软化段拐点 t 以上和以下的某区段.

式(50)左端关于 w 积分可得折迭突变模型的总势能函数

$$\Pi_0 = \frac{1}{3} w^3 + aw. \quad (54)$$

总势能 Π_0 对 w 的 2 阶导数 $\partial^2 \Pi_0 / \partial w^2 = 2w$, 由此可知在图 9 中分枝 1 和分枝 2 上, 分别有

$$\frac{\partial^2 \Pi_0}{\partial w^2} < 0, \quad \frac{\partial^2 \Pi_0}{\partial w^2} > 0. \quad (55)$$

由 Dirichlet 法则知, 在分枝 1 上系统平衡状态不稳定, 分枝 2 上系统平衡状态稳定. 折迭突变的这一性质在逆冲断层地震中, 则表现为系统平衡位置最终要从状态不稳定的分枝 1 到达状态稳定的分枝 2. 式(50)对于不为 0 的同一 a 值, 系统有 2 个平衡位置与其对应, 当 K 值给定, 若平衡位置 w 由分枝 1 经过 $K - 1$ 轴过渡到分枝 2 (即两条准静态平衡路径可以延伸到 $K - 1$ 轴), 潜断层带将以准静态形式破裂. 否则, 平衡位置 w 将以跳跃形式到达分枝 2, 潜断层带以动力失稳形式破裂, 即主震发生.

5 折迭突变模型对逆冲断层地震主震的描述

对于固定的 K 值,在分枝 1 上,当 $v_l < v_h$ 且 v_l 增大时,图 7 软化段上 $Q'(v_l)$ 减小,式(51)中的 J 也相应减小,由式(49)和式(52)知, a 与 w_1 由负向 0 变化,即平衡位置 (a, w_1) 沿图 9 分枝 1 右行;在分枝 2 上, $v_l > v_h$ 且 v_l 增大时,图 7 软化段上 $Q'(v_l)$ 增大,式(51)中的 J 也相应增大,由式(49)和式(53)知, a 负向增大而 w_2 正向增大,即平衡位置 (a, w_2) 沿图 9 分枝 2 左行.下面来看式(47)中的 $K < 1$ 或式(51)中的 $k_L < -Q'(v_h)$ 时, v_l 趋近和离开 v_h 点,即平衡位置 (a, w) 趋近和离开 $K - 1$ 轴时的情况.

如上述,平衡位置起先沿分枝 1 右行.由于 $k_L < -Q'(v_h)$,故在分枝 1 上存在某点 $w_j (< 0)$ 或小于 v_h 的某点 v_{ij} 处,会使得 $k_L = -Q'(v_{ij})$,从而在 w_j 处,

$$Q'(v_{ij}) + k_L = 0, \quad (56)$$

也即 Cook 失稳准则^[14-15]得到满足,这导致式(51)中

$$\frac{\delta v_r}{\delta v_l} = 0 \quad (57)$$

或 $J = 0$, 即式(42)得到满足,系统处于临界状态.

由前文知 $d\rho_r/dt = d\sqrt{v_r^2 + u_r^2}/dt = c_1 > 0$, $dv_r/dt > 0$, 即 $\delta v_r (> 0)$ 是微量,但并不为 0. 系统位置在图 9 中不包括原点的准静态平衡路径 1 上变化时, δv_r 与 δv_l 是同阶微量.

式(57)中, $\delta v_r/(\delta v_l) = 0$ 或

$$\frac{\delta v_l}{\delta v_r} \rightarrow \infty \quad (58)$$

表明,在 v_{ij} 处形变 v_l 将有一个突然的(有限)改变量而使平衡位置脱离分枝 1. 由于图 9 中除 $a = 0$ 之外,同一 a 值 w 有两个状态与之对应,故平衡位置将从分枝 1 上的 w_j 点跳到分枝 2 上 w_s 点. 式(58)在物理上表示一个任意小的远场微位移 δv_r , 会引起潜断层带一个突然的有限位移量,也称为 Stuart^[16] 断层失稳准则. 需要指出,由式(51)及图 7 和图 9 知,在分枝 2 的 w_s 处有与式(56)相同的关系式

$$Q'(v_{is}) + k_L = 0 \quad (59)$$

成立.

由式(42) $J = 0$ 和式(52)和式(53)可得 w 跳跃前后潜断层带的形变(近似)值为

$$\begin{cases} v_{ij} = \left\{ 1 - \frac{1}{1+m} \left[\frac{m(1-K)}{1+m} + \sqrt{\frac{m^2}{(1+m)^2} (1-K)^2 + 2(1-K)} \right] \right\} v_h, \\ v_{is} = \left\{ 1 - \frac{1}{1+m} \left[\frac{m(1-K)}{1+m} - \sqrt{\frac{m^2}{(1+m)^2} (1-K)^2 + 2(1-K)} \right] \right\} v_h. \end{cases} \quad (60)$$

由式(60)可得图 9 中 w 的跳跃幅值

$$\Delta w = \frac{\Delta v_l}{v_h} = \frac{v_{is} - v_{ij}}{v_h} = \frac{2}{1+m} \sqrt{\frac{m^2}{(1+m)^2} (1-K)^2 + 2(1-K)}. \quad (61)$$

平衡位置跳跃表示逆冲断层地震主震发生,式(61)中的 $\Delta v_l = v_{is} - v_{ij}$ 便是由于主震发生后,新生断层带半错距沿 y 轴方向的分量. 由式(24)可得潜断层带失稳前后断层带内沿 y 轴方向的切应变为 $\gamma_{ij} = v_{ij}/l$, $\gamma_{is} = v_{is}/l$; 由图 6 应变圆知,潜断层带失稳破裂前后断层带内最大切应变为

$$\begin{cases} \gamma_{lj\max} = \gamma_{lj} \csc 2\psi = \gamma_{lj} \sqrt{1 + \cot^2 2\psi}, \\ \gamma_{ls\max} = \gamma_{ls} \sec 2\psi = \gamma_{ls} \sqrt{1 + \cot^2 2\psi}. \end{cases} \quad (62)$$

由式(24)及式(61)和式(62),可得逆冲断层地震主震发生新生断层带的最大半错距

$$\Delta\rho_{l\max} = \csc 2\psi \cdot \Delta v_l = \frac{2v_{li}}{(1+m)\sin 2\psi} \sqrt{\frac{m^2}{(1+m)^2} (1-K)^2 + 2(1-K)}. \quad (63)$$

6 潜断层失稳破裂围岩弹性能释放量及其动力效应

6.1 围岩弹性能释放量的折迭突变模型表示法

由式(54)可得,图9中系统平衡位置 w 从 j 点沿 js 直线段跃到 s 点时的能量变化为

$$\begin{aligned} \Delta\Pi_0 &= \int_j^s d\Pi_0 = \int_j^s \left[\frac{\partial\Pi_0}{\partial w} dw + \frac{\partial\Pi_0}{\partial a} da \right] = \\ &= \int_{w_j}^{w_s} (w^2 + a) dw + \int_{a_j}^{a_s} w \cdot da = \\ &= \int_{w_j}^{w_s} (w^2 + a) dw = \frac{w_s^3 - w_j^3}{3} + a_s w_s - a_j w_j, \end{aligned} \quad (64)$$

上式推导时,已利用了沿图9中 js 直线段 $a_s = a_j, da = 0$ 的相应于 $J_j = J_s = 0$ 的条件.将 $w_j = -w_s, a_j = -w_j^2 = -w_s^2$ 代入式(64),并注意 $w_s > 0$, 可得围岩无量纲能量释放量

$$\Delta\Pi_0 = -\frac{4}{3} w_s^3 (< 0). \quad (65)$$

$\Delta\Pi_0 = \Pi_{0s} - \Pi_{0j} < 0$ 表明 s 处的系统能量低于 j 处的能量.围岩是弹性体,并且导得式(48)和式(62)的式(40)为围岩-潜断层半条带与切应力 τ 有关的功能增量关系,故由式(48)和式(53)及式(65)可以得到 js 跳跃阶段围岩释放的能量中与切应力 $s_{xy} = \tau_{xy} = \tau$ 有关的量纲化弹性能为

$$\begin{aligned} \Delta\Pi &= \frac{(1+m)^2}{2K} Q(v_{li}) v_{li} \cdot \Delta\Pi_0 = \\ &= -\frac{2}{3K} Q(v_{li}) v_{li} \frac{1}{(1+m)} \left[\frac{m^2}{(1+m)^2} (1-K)^2 + 2(1-K) \right]^{3/2}. \end{aligned} \quad (66)$$

式(66)中的 $\Delta\Pi$ 乘上 $\csc^2 2\psi = (1 + \cot^2 2\psi)$ 后,得到的 $(1 + \cot^2 2\psi) \Delta\Pi$ 为失稳期间围岩释放的弹性能中超过潜断层形变破裂所消耗的能量以上的弹性能部分,其中的 $\cot^2 2\psi \cdot \Delta\Pi$ 为与偏应力差 $(s_y - s_x)/2 = (\sigma_y - \sigma_x)/2$ 有关的弹性能释放量. $\csc^2 2\psi \cdot \Delta\Pi$ 中很小部分消耗于潜断层带岩体的动力破碎,大部分将转变成围岩自身动能.

式(65)是 w 跳跃时围岩释放弹性能释放量的近似值,这是因为由精确平衡方程式(40)导得由式(46)表示的近似平衡方程时,已略去了 $(v_l - v_{li})$ 的3次以上项的缘故.

6.2 潜断层带失稳破裂围岩弹性能释放的动力效应

潜断层带失稳破裂,图4中围岩、潜断层带的应力从 j 圈跃变到 s 圈, σ_{yj} 跃降为 σ_{ys} , 切应力 τ_j 跃降为 τ_s , 但是 σ_{xj} 跃增为 σ_{xs} ; 相应图7中潜断层强度从 $Q(v_{lj})$ 于瞬间骤降为 $Q(v_{ls})$, 这使得图8中 $x = -l$ 的交界面上, H_j, N_{xj} 于瞬间骤变到 H_s, N_{xs} , 围岩发生剧烈的动力效应.

对弹性体突然加载,其荷载效应相当于所加荷载量值的2倍,突然卸载的荷载效应也是所加荷载量值的2倍,只不过方向相反而已.对于图10(a)中长度 L 很大、剪切刚度为 k_L 的弹性体,剪力为 H 值、切应力为 τ 值时,其 A 端位移到图10(a)中的 v_L 处,相应弹性体中的剪切应变

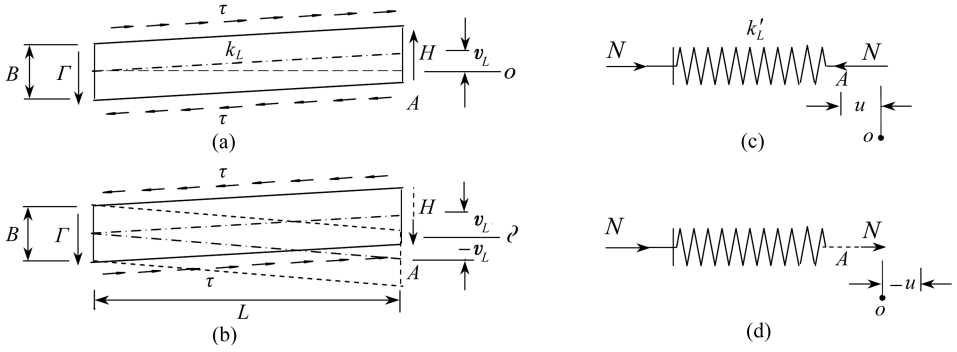


图 10 突然卸载的荷载、位移效应

Fig. 10 Effects of load and displacement with sudden unloading

能 $\Delta\Pi_1 = k_L (v_L)^2/2$ 。此时若将力 H 和应力 τ 突然移去,弹性体 A 端立即下弹并发生振动,由于能量守恒, A 端首次瞬间最大位移可达图 10(b) 中平衡点 o 以下的 $-v_L$ 处。也就是说对于不计质量与波阻的弹性块,突然卸载的荷载效应相当于将量值相同的荷载 $-H$, $-\tau$ 反向施加载到弹性体上。此惯性力的计算公式为

$$H = \sqrt{2k_L \Delta\Pi_1} \quad (67)$$

式(67)表明,惯性力的大小由弹性块剪切刚度为 k_L 与所释放的弹性能 ΔE 共同决定。

围岩-潜断层带系统失稳时围岩,潜断层交界面上的剪力和轴向力从 H_j, N_{sj} 突变到 H_s, N_{ss} ,这将在交界面处使围岩受到横向和纵向惯性力 H_i 和 N_{si} ,引起围岩切向、纵向的剧烈振动,此振动将以剪切波和纵波的形式向远方传播,造成环境的次生破坏。惯性力 H_i 和 N_{si} 的计算原理同式(67),若计入半条带波阻,乘以折减系数 $\zeta (< 1)$,用式(66)中的 $\Delta\Pi$ 替代 $\Delta\Pi_1$,由式(67)可得惯性力

$$H_i = \sqrt{2k_L \zeta \Delta\Pi}, \quad N_{si} = \cot 2\psi \sqrt{2k'_L \zeta \Delta\Pi} \quad (68)$$

式中, $k_L = (GDB/L)$, $k'_L = (EDB/L)$ 为围岩半条带的横向剪切刚度和纵向压缩刚度, E 为围岩岩体的弹模, $\Delta\Pi$ 为式(66)中的围岩弹性能瞬间释放量。式(68)中 H_i, N_{si} 分别除以刚度 k_L, k'_L 后,可得断层失稳破裂使围岩端面产生的横向和纵向最大瞬间位移振幅分别为

$$v_i = \sqrt{\frac{2\zeta \Delta\Pi}{k_L}}, \quad u_i = \cot 2\psi \sqrt{\frac{2\zeta \Delta\Pi}{k'_L}} \quad (69)$$

而

$$\rho_i = \sqrt{v_i^2 + u_i^2} = \sqrt{\frac{2L}{DB} \left(\frac{1}{G} + \cot^2 2\psi \frac{1}{E} \right) \zeta \Delta\Pi} \quad (70)$$

则应当与地震观察站用于测定断层地震震级的最大位移 u_{\max} 有某种对应关系。

7 讨 论

7.1 逆冲断层地震主震后的应力降、岩体形变的变化

Lin 等^[9]在地震统计数据中发现,逆冲断层地震使得周围大部分地壳的应力降低,但却使得震源断层上方(垂直方向)的应力增加。这与图 4 中应力圆的状况对应。图 4 中震后围岩、新生断层带的应力从外层 j 圈跃变到内层 s 圈,最大主应力从 σ_{1j} 骤降为 σ_{1s} ,最小主应力从 σ_{3j} 骤增为 σ_{3s} 。由于围岩中的应力、能量得到释放,图 4 中代表围压的圆心位置 $\bar{\sigma} = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$ 震后会有某种减小;相应于图 4 围压 $\bar{\sigma}$ 的减小,图 5 中的代表体积应变的圆心位置 $\theta_i/2$ 也会有某

种减小,围岩产生弹性恢复;图6中新生断层带岩体破裂扩容,其应变增大程度远大于围岩.震时围岩、断层体积增大的倾向,将增强6.2节围岩切向、轴向振动的效应,这对应于外力骤变式(37)中体积应变能变化对逆冲断层运动加剧的贡献.

7.2 潜断层倾角和其他参数对逆冲断层地震主震强度的影响

从图4中应力圆看到, ψ 角小表明,在半条带的外力系中切应力 $\tau = \tau_{xy} = s_{xy}$ 对潜断层带失稳破裂的贡献小,而正应力差 $(\sigma_y - \sigma_x)/2 = (s_y - s_x)/2$ 对潜断层带失稳破裂的贡献大.试验研究表明,对于岩土介质,主应力差 $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ 大,断裂时的断层倾角 ψ 小.与上覆岩土体、海水重力有关的 σ_3 通常变化不大,最大主应力 σ_1 大才会使主应力差增大,而这又必然引起图4中围压 $\bar{\sigma} = (\sigma_1 + \sigma_3)/2 = (\sigma_y + \sigma_x)/2$ 增大.由Coulomb-Mohr强度准则,围压 $\bar{\sigma}$ 大时潜断层介质的平均剪切强度 γ_{lo} 大.由式(23) $v_{lc} = \gamma_{lc}l$ 就要增大,式(26)中潜断层带抗剪强度 $Q_{\max} = Q(v_{lc})$ 相应增大.要使抗剪强度大的断层失稳破裂所施外力和输入的能量都要大,相应地震发生时围岩能释放的能量也要大.

为看清其他参数的影响,将式(43)代入式(44)的第2式,得到潜断层带在其 $Q(v_l)$ 曲线拐点 t 处的值

$$Q(v_{lt}) = \eta v_{lt} = \frac{gBD}{l} \exp\left[-\frac{1+m}{m}\right] \left(\frac{1+m}{m}\right)^{1/m} v_{lo}, \quad (71)$$

将式(47)中的 $K = k_L/(\eta m) = G \exp[(1+m)/m]/(gLm)$, $v_{lo} = \gamma_{lo}l$ 和式(71)代入式(66),可得

$$\begin{aligned} \Delta\Pi = & -\frac{2}{3K}Q(v_{lt})v_{lt} \frac{1}{(1+m)} \left[\frac{m^2}{(1+m)^2} (1-K)^2 + 2(1-K) \right]^{3/2} = \\ & -\frac{2g^2BDL}{3G^2l^2} \exp\left[-\frac{1+m}{m}\right] \left(\frac{1+m}{m}\right)^{2/m} v_{lo}^2 \frac{m}{(1+m)} \times \\ & \left[\frac{m^2}{(1+m)^2} (1-K)^2 + 2(1-K) \right]^{3/2} = \\ & -\frac{2g^2BDL}{3G} \gamma_{lo}^2 \exp\left[-\frac{1+m}{m}\right] \left(\frac{m}{1+m}\right)^{(m-2)/m} \times \\ & \left[\frac{m^2}{(1+m)^2} (1-K)^2 + 2(1-K) \right]^{3/2}. \end{aligned} \quad (72)$$

式(47)中的 $K = k_L/(\eta m) = k_L/|Q'(v_{lt})|$ 是围岩切向刚度与断层 $Q(v_l)$ 曲线软化段拐点 t 处斜率的绝对值之比.从式(71)看到,式(26)中 $Q(v_l)$ 曲线指数 m 大,即 K 值小; γ_{lo} 大,即围压大,则围岩弹性能释放量 $\Delta\Pi$ 大,式(63)断层处最大半错距 $\Delta\rho_{l\max}$ 大,式(70)围岩端面的最大位移振幅 ρ_i 也大.

8 结 论

1) 逆冲断层运动中,围岩-潜断层带系统作准静态形变的功能量增量关系可以分解为关于体积应变能的功能增量关系和关于偏应力能的功能增量关系.偏应力控制岩体破裂,采用突变理论方法对围岩-潜断层带系统相应偏应力的功能量增量关系所作的分析表明,逆冲断层地震主震的孕育、发震、震后过程可归结为折迭突变模形.折迭突变展示的性状可以对逆冲断层地震主震的发震条件、断层失稳破裂起、终点位置,对断层失稳错距、围岩弹性能释放量和围岩位移振幅等效应作恰当描述.

2) 逆冲断层运动的强度与诸多参数有关. 围岩的围压 $\bar{\sigma}$ 大, 主应力的差值 $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ 大; 逆冲断层面倾角 ψ 角小, 围岩切向刚度与断层 $Q(v_l)$ 曲线软化段拐点处斜率的比值 $K = k_L/(\eta m) = k_L/|Q'(v_l)|$ 小, 则地震发生时围岩弹性能释放量 $\text{csc}^2 2\psi \cdot \Delta\Pi$ 大, 断层最大半错距 $\Delta\rho_{\text{imax}}$ 大, 断层失稳破裂围岩瞬间应力降引起的围岩端面位移振幅 ρ_i 也大.

参考文献 (References):

- [1] Jeger J C, Cook G W. *Fundamentals of Rock Mechanics* [M]. London: Chapman and Hall Press, 1979: 466-470.
- [2] Rice J R. New perspectives in crack and fault dynamics [C] // Aref H, Phillips J W. *Mechanics for a New Millennium (Proceedings of the 20th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics, 27 Aug—2 Sept 2000)*. Chicago: Kluwer Academic Publishers, 2001: 1-23.
- [3] 殷有泉, 郑顾团. 断层地震的尖角型突变模型 [J]. 地球物理学报, 1988, **31**(6): 657-664. (YIN You-quan, ZHENG Gu-tuan. A cusp type catastrophic model of fault earthquake [J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1988, **31**(6): 657-664. (in Chinese))
- [4] 杨修信, 殷有泉, 康仲远, 刘光勋, 王廷韞, 陈沅俊, 张彦山. 压扭性断层地震的 Cusp 型突变分析 [J]. 中国科学 (B 辑), 1994, **24**(6): 656-663. (YONG Xiu-xin, YIN You-quan, KANG Zhong-yuan, LIU Guang-xun, WANG Ting-yun, CHEN Yuan-jun, ZHANG Yan-shan. The cusp type catastrophe analyses of compresso-shear fault earthquake [J]. *Science in China (Series B)*, 1994, **24**(6): 656-663. (in Chinese))
- [5] 潘岳, 李爱武. 走滑式断层地震的折迭突变模型 [J]. 应用数学和力学, 2010, **31**(3): 324-336. (PAN Yue, LI Ai-wu. Fold catastrophe model of strike-slip fault earthquake [J]. *Applied Mathematics and Mechanics (English Edition)*, 2010, **31**(3): 324-336. (in Chinese))
- [6] 何宏林, 孙昭民, 王世元, 王纪强, 董绍鹏. 汶川 M_s 8.0 地震地表破裂带 [J]. 地震地质, 2008, **30**(2): 359-362 (HE Hong-lin, SUN Zhao-min, WANG Shi-yuan, WANG Ji-qiang, DONG Shao-peng. Rupture of the M_s 8.0 Wenchuan earthquakes [J]. *Seismology and Geology*, 2008, **30**(2): 359-362. (in Chinese))
- [7] Massimo C, Concetta N, Ekström G. Static stress changes and fault interaction during the 1997 Umbria-Marche earthquake sequence [J]. *J Seismology*, 2000, **4**(4): 501-506.
- [8] Ben-zion Y. Dynamic rupture in recent models of earthquake faults [J]. *J Mech Phys Solids*, 2001, **49**(9): 2209-2244.
- [9] LIN Jian, Stein R S. Stress triggering in thrust and subduction earthquakes and stress interaction between the southern San Andreas and nearby thrust and strike-slip faults [J]. *J Geophys Res*, 2004, **109**(B02303): 1-19.
- [10] Jaime O H, Diane I D, Russell R, Stress changes induced by earthquakes and secular stress accumulation in the Buller Region, south island, New Zealand (1929-2002) [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2005, **162**(2): 291-310.
- [11] 卡恰诺夫 L M. 塑性理论基础 [M]. 周承伺译. 北京: 人民教育出版社, 1982: 147-148. (Kachanov L M. *Fundamentals of Plastic Theory* [M]. Translated by ZHOU Sheng-tong. Beijing: People's Education Press, 1982: 147-148. (in Chinese)).
- [12] Karcinovic D. Statistical aspects of the continuous damage theory [J]. *Int J Solids Structures*, 1982, **18**(3): 551-562.
- [13] 凌复华. 突变理论——历史、现状和展望 [J]. 力学进展, 1984, **14**(4): 289-403. (LING Fu-hua.

- History, present and advances of the catastrophe theory[J]. *Advances in Mechanics*, 1984, **14**(4): 289-403. (in Chinese)
- [14] Cook N G W. The failure of rock[J]. *Int J Rock Mech Min Sci*, 1965, **2**(3):389-403.
- [15] 陈颢. 地壳岩石的力学性能[M]. 北京:地震出版社, 1988. (CHEN Yong. *Mechanical Properties of Crustal Rock*[M]. Beijing: Earthquake Press, 1988. (in Chinese))
- [16] Stuart W D. Quasi-static earthquake mechanics[J]. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 1979, **17**(6): 1115-1120.

Analysis of Main Shock of Thrust Fault Earthquake by Catastrophe Theory

PAN Yue¹, ZHAO Zhi-gang²

(1. *College of Civil Engineering, Qingdao Technological University, Qingdao, Shandong 266520, P. R. China;*

2. *Key Laboratory of Mine Disaster Prevention and Control, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266510, P. R. China)*

Abstract: The relationship between work and energy increment of thrust fault system with quasi-static deformation can be decomposed into two parts, i. e. the relationship between work and energy increment of volume strain energy and that of deviation stress energy, which was analyzed by using method of catastrophe theory. The research indicates that the characteristics displayed by fold catastrophe model can appropriately describe the earthquake generation condition, the evolvement process of main shock of thrust fault earthquake and some important earthquake effects as well. The bigger the surrounding press of surrounding rock is, the bigger the maximum principal stress is. The smaller the incidences of the potential thrust fault surface are, the smaller the rate between the tangential stiffness of surrounding rock and the slope is, which is at inflexion point on the softened zone of fault shearing strength curve. Thus when earthquake occurs, the larger the elastic energy releasing amount of surrounding rock is, i. e. the larger the intensity of earthquake is. The larger the half distance of fault dislocation is. The larger the displacement amplitude of surrounding rock end face is. Fracturing, expanding of the fault rock body and releasing of volume strain energy of surrounding rock while earthquake occurs enhance the foregoing earthquake effects together.

Key words: thrust fault; earthquake; fold catastrophe model; elastic energy releasing amount; distance of fault dislocation