

# 横向断层对主断层粘滑扩展过程阻止 和滞后作用的实验研究

卢振业<sup>1)</sup> 加藤尚之<sup>2)</sup> 山本清彦<sup>2)</sup> 平澤朋郎<sup>2)</sup>

1) 国家地震局分析预报中心

2) 日本东北大学理学部

## 摘要

本文给出了一种带有软弱障碍体的粘滑实验结果。软障碍体由垂直于主断面的孤立锯缝加以模拟。实验表明，这种软障碍体对粘滑失稳扩展有明显的阻止(或称为止裂)和滞后作用。这种止裂或滞后作用依赖于锯口的深度  $l$  和施于主断面上的正应力  $\bar{\sigma}_s$ 。止裂和滞后效果随锯口深度增加，滞后效果并不单调随断面上正应力增加，滞后时间和平均正应力曲线呈V形分布。沿断层的视破裂能  $G$  表明，失稳扩展停止或滞后的前方往往不是高能垒，说明破裂的停止或滞后并不单是高能壁垒阻挡一种机制，软障碍体具有另一种止裂机制，它可能是通过对应变能的吸收而起到使失稳扩展停止或滞后。本实验还展示了在粘滑事件之间时空上的复杂图象，如本实验中复合构造格架情况下所见的那样，这对理解强震序列的时空关系会有所启发。粘滑扩展过程的停止或滞后机制的研究将有助于粘滑机制的完善。

**关键词** 粘滑；失稳扩展；软障碍体；滞后效应；止裂机制

## 一、引言

自从 Brace 和 Byerlee<sup>[1]</sup> 提出粘滑可能是地震的一种机制以来，人们发现，地震过程的许多现象可以用粘滑模型加以解释，尤其是这一机制可以说明地震应力降较小及地震可沿同一断层反复发生这些用其它模型难以解释的观测事实，从而被许多地震学家所接受。与此同时，实验室内的粘滑研究也得到蓬勃发展，Byerlee 等<sup>[2]</sup>和 Wong<sup>[3]</sup>给出了带有预制断面的不同岩样产生粘滑的应力条件。Byerlee 和 Brace<sup>[2]</sup>，Brace<sup>[4]</sup>，Ohnaka(1973, 1975) 及 Stesky 等<sup>[5]</sup>分别对粘滑特性，诸如断面正应力、滑动表面的粗糙程度、压机的刚度及其它实验环境因素进行了系统的研究。在此类实验的前期研究中，多数工作多局限于确定剪切滑动的图象，最近几年则侧重于粘滑的动态过程与地震震源机制间相互关系的研究。Johnson 等<sup>[6]</sup>，Johnson 和 Scholz<sup>[7]</sup>确定了破裂速度的源参数、质点速度和粘滑事件的应力降，结果与理论计算及野外观测一致。Ida<sup>[8,9]</sup>引进滑动弱化模型到破裂尖端，并引入临界位移的概念，指出视破裂能  $G$  是表征介质强度特征的重要参量。Okubo 和 Dieterich<sup>[10,11]</sup>观测到破裂过程中的粘滑事件与破裂尖端的滑动弱化特征是相似的，并发现视破裂能  $G$  依赖于正应力和断面的粗糙程度，进而他们证实破裂速度随破裂传播的

1988 年 9 月 21 日收到本文初稿，1989 年 4 月 25 日决定采用。

距离而增加, 这与 Andrews<sup>[12]</sup> 的理论研究结果是相符的。Andrews<sup>[12]</sup>, Okubo 和 Diederich<sup>[13]</sup> 及 Ohnaka 等<sup>[13]</sup>先后研究了粘滑的成核作用, 指出粘滑过程往往从断面某处开始产生稳定滑动, 然后从此点向两侧扩展。当扩展距离达到某一临界长度  $L_c$  时, 稳定滑动则变为非稳定滑动, 滑动的扩展速度突然由每秒数米或数十米猛增到每秒上千米, 甚至达到瑞利波速。所有这些研究对粘滑机制的发展与完善均起到了重要作用, 同样对震源机制的深入研究也起到了积极的推动作用。

与此同时, 许多人对粘滑产生的原因也进行了研究, 如对高频波辐射机制的理论研究和室内观测等。其中多数理论模型均做了在断层面上应力和强度的非均匀假设。Kanamori<sup>[14]</sup> 和 Aki<sup>[15]</sup> 先后提出了凹凸体模式和障碍体模式, 虽然两者在含义上有些不同, 但在指出非均匀的介质分布上则是一致的, 两者均表明非均匀性在地震的初始过程和地震扩展过程中起着重要作用。

虽然粘滑机制被越来越多的地震学者所接受, 而且在解释许多地震过程中的关键问题中有理想的结果, 但将室内实验所得结论与实际地震过程对比时, 仍有若干不尽人意之处。我们知道, 在以往的粘滑实验中, 对地震发生过程的模拟是精细的, 但对地震扩展的停止过程却研究很少。众所周知, 一种地震理论, 若只有发生和传播机制而无停止机制, 就难以说是一种完满的地震理论。粘滑模型若是一种圆满的地震理论, 那么它除可以解释地震的孕育、发生和传播过程外, 同时还必须可以阐明地震的停止过程。虽然许多学者在理论研究和数值模拟中利用凹凸体和障碍体模型解释破裂扩展的停止过程, 但在室内实验方面还未曾见有关于失稳扩展如何衰减和停止的研究报道。为此, 我们设计了本实验, 企图在有关粘滑过程的停止或滞后研究中提供一些实验结果。

## 二、实验装置和样品制作

实验是在日本东北大学地震预知观测中心的真双轴刚性伺服压机上完成的。该压机两轴加压系统独立, 垂直向加载能力为  $4.9 \times 10^6 \text{ N}$ , 水平向加载能力为  $2.9 \times 10^6 \text{ N}$ , 压机的刚度为  $4 \times 10^7 \text{ N/cm}$ , 两轴加载速率可预先独自设定。在此实验中, 先通过水平及垂直方向以一定比例加载, 使断面上剪应力在零值附近。当断面上正应力达到预定值后, 在保持正应力不变的情况下, 使水平方向的压力增加而垂直方向压力减小, 从而使剪应力以常速率增加, 直至沿断面产生粘滑事件。而一旦粘滑事件产生, 则由控制系统使两轴压力状态保持不变。此时动态传感元件的信号被触发采集并进入瞬态记录仪, 静态传感元件的信号连续直接进入计算机。当将瞬态记录仪中的信号贮存到计算机后, 再对样品增加剪应力, 直到下次粘滑事件发生。压机的参量也连续直接进入计算机。其工作框图如图 1 所示。

本实验中所用岩石样品如图 2 所示。岩样由日本东山花岗岩制成, 其主要参数为: 杨式模量为  $5.6 \times 10^4 \text{ MPa}$ , 泊松比为 0.17, P 波速度为  $5.5 \text{ km/s}$ , S 波速度为  $3.3 \text{ km/s}$ 。岩石样品尺寸为  $30\text{cm} \times 30\text{cm} \times 10\text{cm}$ , 沿对角线锯开, 此断面模拟断层面, 后面我们亦称其为主断层面, 粘滑事件便沿此断面发生。

本实验中, 对样品分三种情况进行实验: 无锯口, 锯口深度  $l = 3\text{cm}$  和  $l = 7\text{cm}$ 。图 2 中箭头所示为锯口形状和位置。对每种情况, 施于主断面上的平均正应力  $\bar{\sigma}_n$  分别为

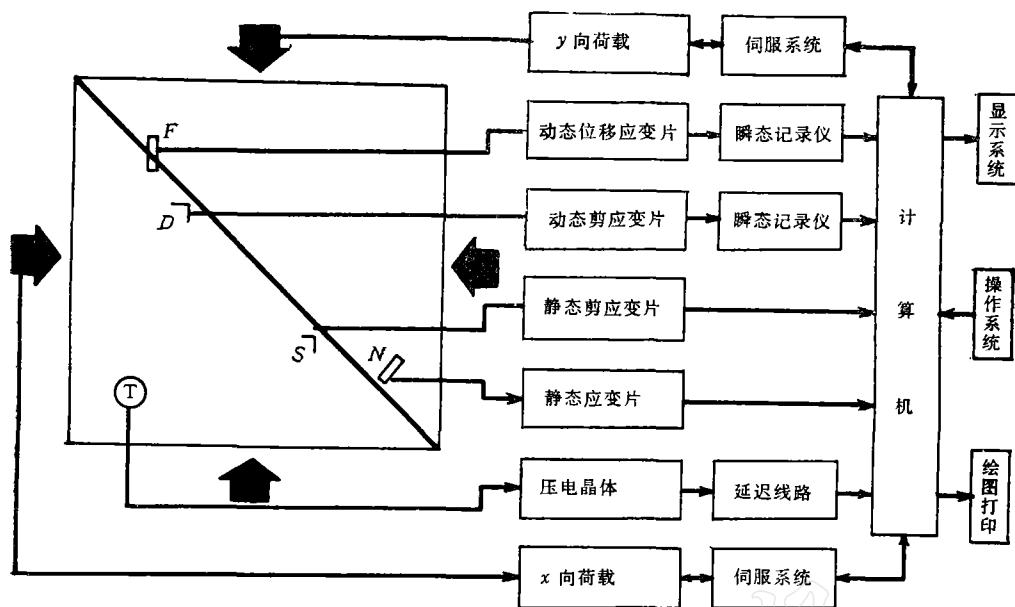


图1 测试系统框图

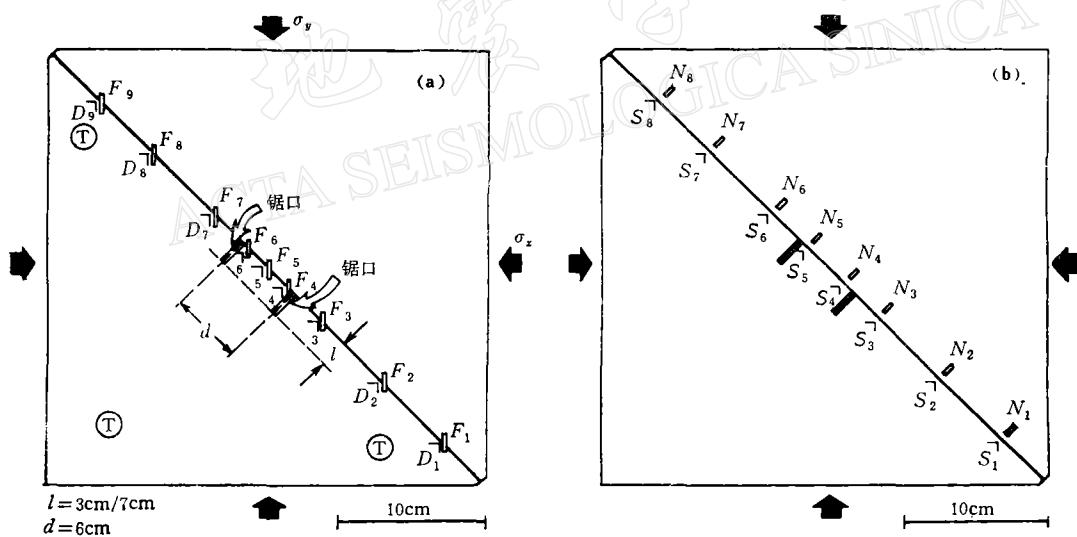


图2 样品及各传感元件位置

2.5 MPa, 5.0 MPa, 7.5 MPa, 10.0 MPa, 12.5 MPa, 15.0 MPa 和 17.5 MPa 七个档次。在每一  $\sigma_n$  水平下记录 6—10 个粘滑事件。

图 2(a) 为记录动态元件的位置图。 $D$  代表动态剪应变片, 用其测量粘滑过程中沿断面不同位置的剪应力;  $F$  代表动态应变片, 使其跨贴在岩样的两盘上, 使中间段不与岩样粘住, 以记录粘滑过程中两盘间不同位置处的相对位移。两种动态应变片的频率响应均为直流到 600 kHz。 $T$  代表陶瓷压电晶体片, 它主要接收失稳滑动前的脉冲信号, 以触发动态感应元件的数字采集器。图 2(a) 中的  $d$  代表两锯口间的中心距离, 锯口宽 1 cm,  $l$  代

替锯口的深度。

图 2(b)是样品的背面元件位置图。 $S$ 代表静态剪应变片， $N$ 代表垂直应变片，两者记录全部实验过程中沿断面不同位置处的应力应变状况。

根据 Kuwahara 等<sup>[16,17]</sup>的实验结果，粘滑(破裂)稳定扩展阶段成核区的临界长度  $L_c$  主要取决于断层表面的粗糙程度。为使  $L_c$  小于本样品断面被锯口分割后各断块的长度，以便观测整个扩展过程，故对主断面进行了研磨抛光；又由于本实验主要目的是研究软障碍体(锯口)对失稳滑动阶段的阻止作用，需要断面高度水平，不致存在较大起伏而形成凹凸体，以影响实验结果的分析，从而对预制主断面进行了精细加工。加工后用万能测平仪测量主断面的平整情况和粗糙程度，采用数字采集，结果如图 3 所示。左上一条线为水平程度测量，在两个断面上进行六条剖面测量，这里仅给出其中一条。受测平仪量程限制，每一剖面长度为 19cm。从图中可见，在 19cm 范围内起伏在  $10\mu\text{m}$  左右，整个断面 40cm 范围内起伏小于  $20\mu\text{m}$ 。

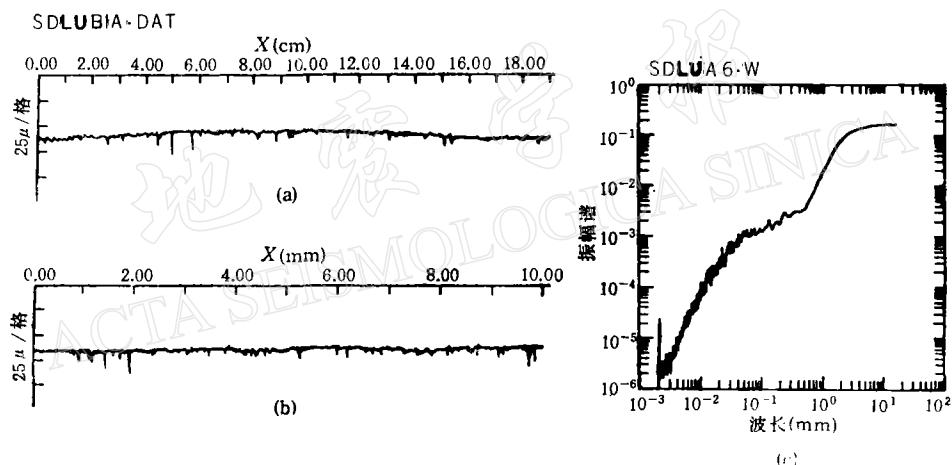


图 3 样品主断面水平度和粗糙度测量结果

- (a) 表面平整度测量原始曲线
- (b) 表面粗糙度测量原始曲线
- (c) 表面粗糙度的谱(箭头所指处为拐角频率)

左下一条测线是断面粗糙程度测量结果，量程为 1cm，每一断面上做五个剖面测量，这里只给出其中一个结果。图 3 右图是五个剖面测量结果振幅谱的平均值，箭头所指处为拐角频率，此拐角频率所对应的波长是表征断面粗糙度的特征量。从图中可知，该样品断面粗糙程度的拐角波长为  $10\mu\text{m}$  左右。根据 Kuwahara 等(1985)的结果， $L_c$  大致为拐角频率所对应波长的 5,000 倍左右，所以本样品  $L_c \approx 5\text{cm}$ ，就是说在 40cm 长的主断面或被锯口分开的断面上，均可细致地研究粘滑过程的每一阶段。

### 三、无锯口情况下的实验结果

如前所述，粘滑过程各阶段的特征很大程度取决于样品状况，尤其是断面状况。为了分析锯口对粘滑过程的影响，首先应对无锯口的样品加以研究。图 4 是其中一次粘滑事

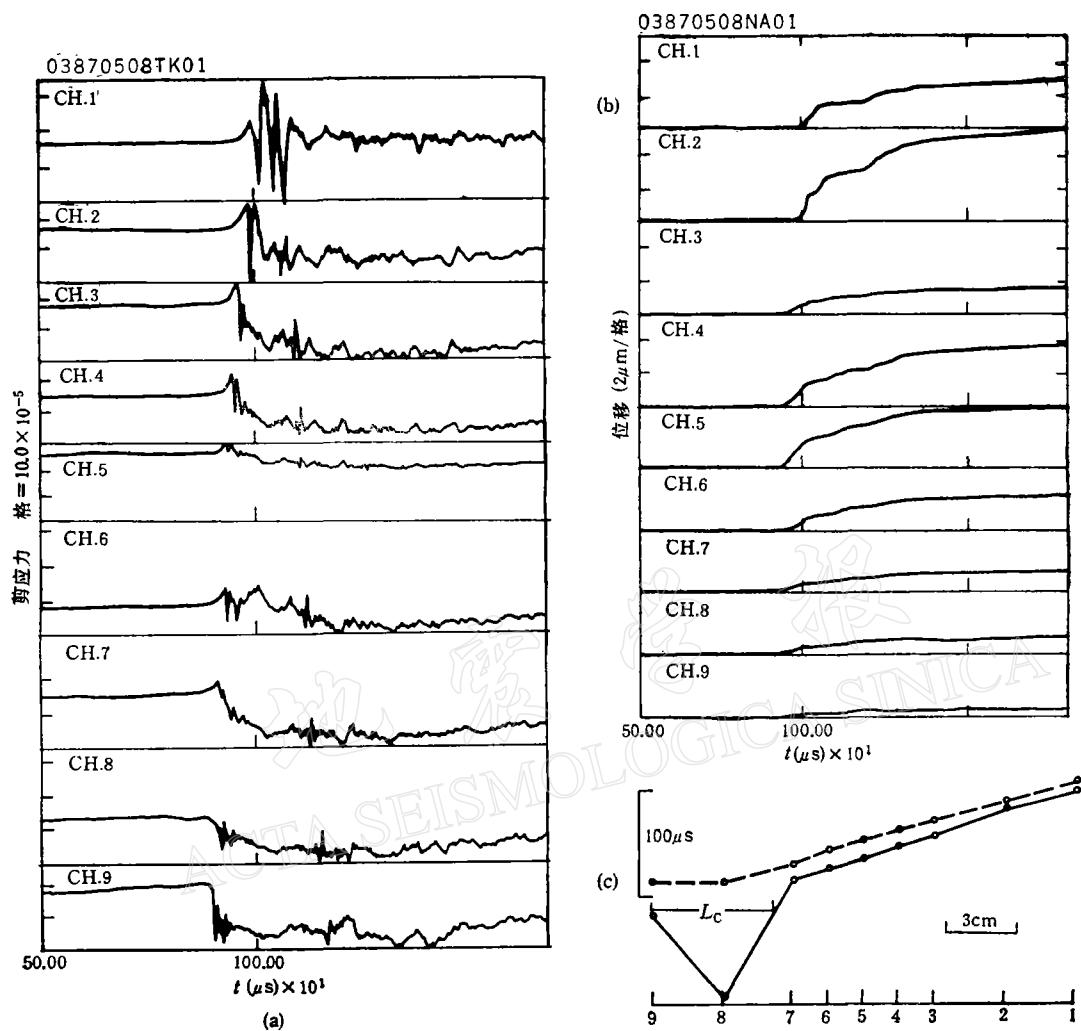


图 4 无据口样品粘滑事件的典型记录

件的典型结果。主断面平均正应力为  $10.0 \text{ MPa}$ , 这是在此应力水平下的第七次粘滑事件。图 4(a) 是沿断面各点处剪应力的变化曲线, 其中通道号与图 2 中的动态剪应变片位置一致。横座标是时间, 单位是  $10 \mu \text{s}$ , 采样间格是  $1 \mu \text{s}$ 。纵座标是应变量, 单位是  $\mu\epsilon$ 。图 4(b) 是相应各动态应变片记录到的两盘相对位移曲线, 横座标如图 4(a), 纵座标是位移量。需要指出的是, 由于所记录到的位移量与粘贴应变片的状况关系密切, 而粘贴又极难保持完全一致, 故其绝对值并不十分可靠, 但一般情况下各状态的相位则是可靠的。可以看出, 断层上各点的位移并不是同时发生的, 它往往从某一点开始产生位移, 然后缓慢向两侧扩展, 这种过程是稳定滑动过程。当这种稳定滑动扩展到一定范围时, 滑动速度突然增加, 则由稳定滑动变为失稳滑动, 然后扩展到断面两端。图 4(c) 是反映这种扩展过程的时空图。横座标为各点位置(见图 2), 纵座标为时间, 实线表示各点稳滑开始时刻, 点线表示失稳滑动时刻。从图中可以看出, 稳滑首先由 8 点开始, 然后以每秒数百米的速度向两侧扩

展。当传播到 7 点时, 稳滑变为以大约  $2\text{km/s}$  的速度失稳扩展。 $L_c$  被称为成核区的临界长度。从图中还可看出, 失稳滑动伴有剪应力的突然释放, 这与完整岩样的剪切破裂完全相同。所以, 我们有时又把失稳滑动过程称为破裂过程, 而把失稳滑动的停止称为止裂。从剪应力曲线看, 稳滑阶段常表现为缓慢下降或持平, 有时也可表现为缓慢上升, 到底表现为哪种情况, 主要取决于在稳滑阶段此处剪应力释放和增加的差值。稳滑之前各点剪应力均为缓慢增加, 这可由静态应变记录中看到(图略)。

失稳滑动一旦产生, 剪应力急剧下降, 往往经数次起伏后达到一稳定值。图 5 为从失稳开始到停止过程中剪应力和位移, 滑动速度和位移, 剪应力和滑动速度关系的示意图。 $\tau_i$  是滑动前的初始应力,  $\tau_p$  为峰值应力,  $\tau_f$  是动摩擦应力,  $d_c$  为临界位移。根据 Palmer 和 Rice (1973) 图 5(a) 的阴影部分面积  $G$  称为视破裂能。 $\dot{D}_{\max}$  为最大滑动速度,  $d_b$  为其对应的位移量。

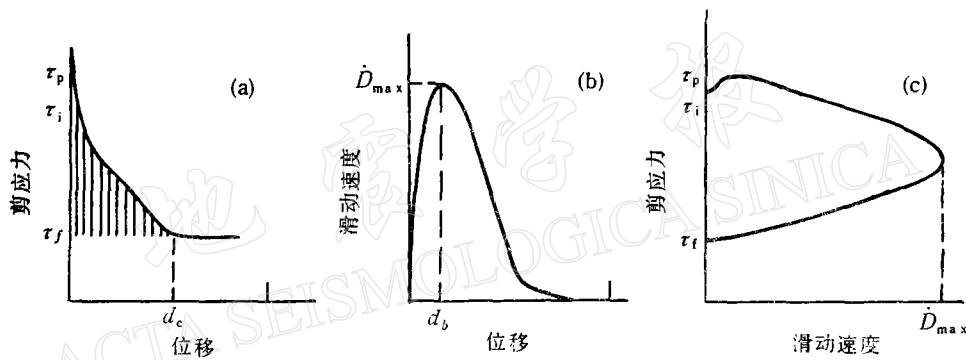


图 5 粘滑过程各量关系示意图

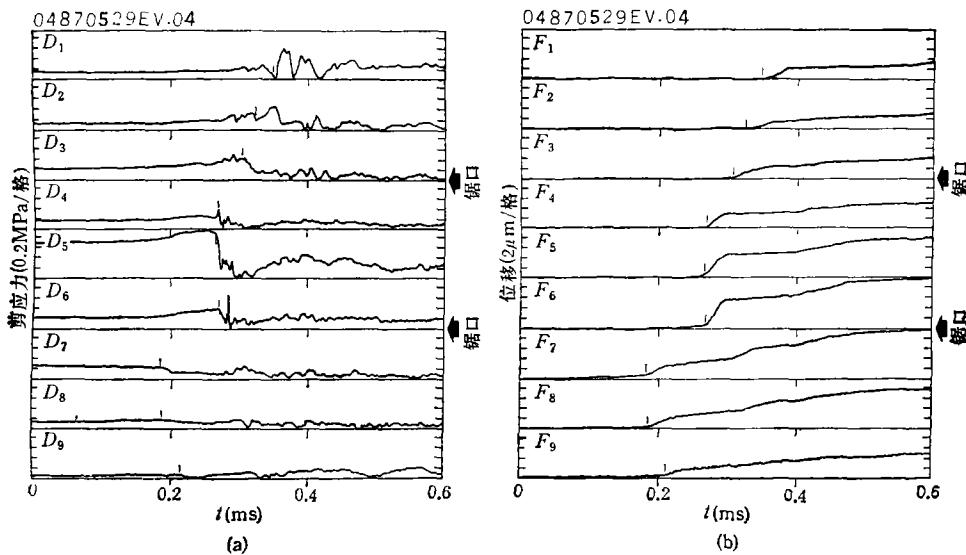


图 6 有锯口模型的典型结果

#### 四、带有锯口的样品的实验结果

带有两个锯口的样品可以看作由一主断层面和两个垂直于它的次级断层所组成的复合构造格架。从粘滑角度看，实际等于在滑动面的中间部位布置两个软障碍体。由于锯口内无任何物质填充，此模型只能代表断层物质强度为零的极限情况。图6是锯口深度 $l = 3\text{cm}$ 时，平均正应力为5.0MPa时的一次典型粘滑事件。图6(a)是剪应力曲线，6(b)是位移曲线。图中标出了两个锯口的位置。从图中可知，粘滑明显地被分为三区，并以锯口为界。点7首先发生稳滑，然后依次向8,9处扩展。随着这种稳定扩展，点7的剪应力缓慢下降，而8,9点的剪应力缓慢上升。当稳滑产生的位移达到一定值时，即图中所标短竖线时发生了失稳滑动，并由点7依次向8,9扩展。在点7,8,9稳滑过程中，6—1点的位移基

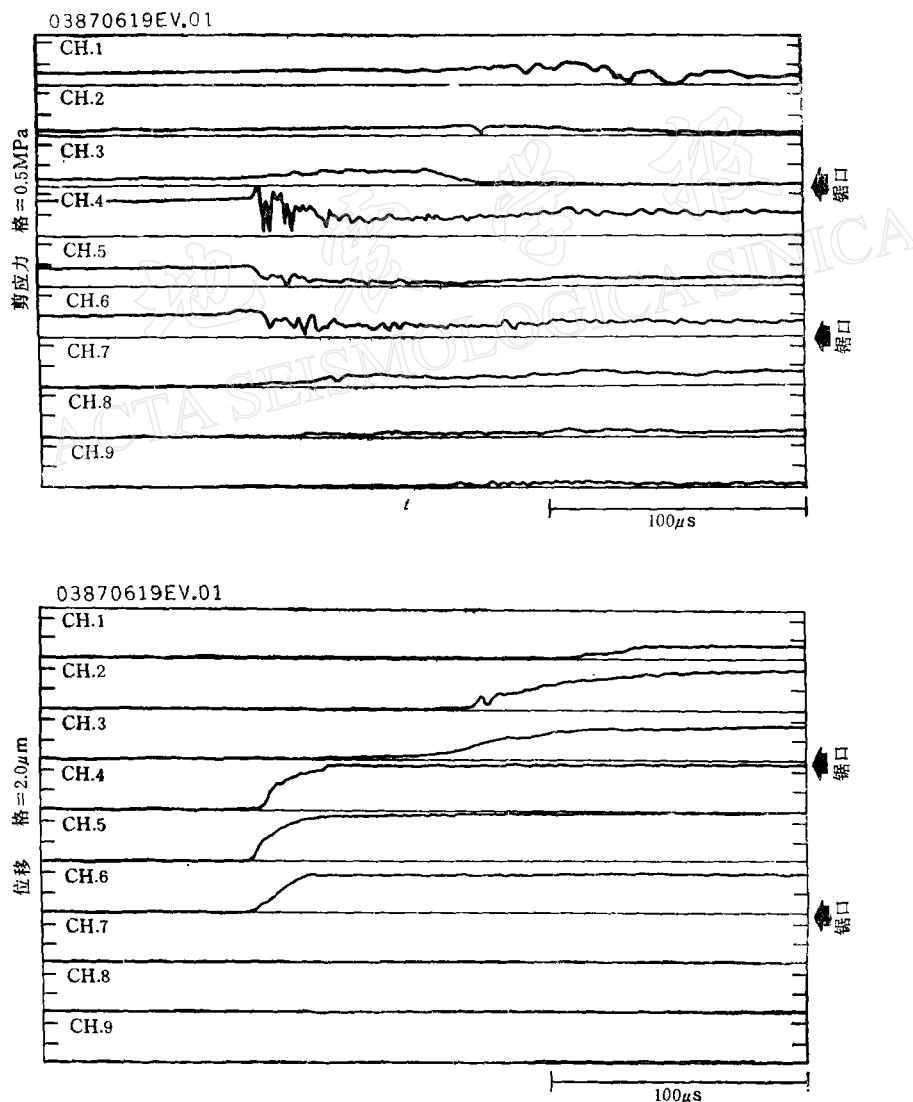


图7 粘滑扩展停止实例

本无反映。而剪应力在点 5 缓慢上升，说明次级断层对主断层粘滑过程的阻隔作用。当点 7—9 发生失稳滑动时，正是点 6 稳定滑动的开始时刻，然后向点 5 扩展，随后失稳滑动。而点 6—4 失稳滑动时刻又是点 3 稳滑的开始，随后又是点 3—1 的失稳滑动。如果我们把从点 1 到点 9 全部滑动作为一次粘滑事件，则可明显看到锯口对失稳扩展的滞后作用；如果将其视为三个次级粘滑事件，则可看到锯口的阻断作用。从实验中还可看到另一类情况，其结果如图 7 所示，这是  $l = 3\text{cm}$ ,  $\bar{\sigma}_n = 17.5\text{MPa}$  时的一次粘滑事件。可以清楚看到，粘滑扩展在两个锯口处被完全停止或滞后的结果。实际上，这种被滞后和停止的情况各种各样，如图 8 所示。 $A, B$  分别为图 6、图 7 所对应事件的时空图； $C, D$  则是  $l = 7\text{cm}$  情况下， $\bar{\sigma}_n$  分别为  $7.5\text{MPa}$  和  $10.0\text{MPa}$  的两次事件。其中既有从中间开始滑动后向两侧扩展的，也有完全被阻止住的。

图 9 是带锯口样品全部实验结果的失稳扩展时空图。图 9(a) 是  $l = 3\text{cm}$  的结果，

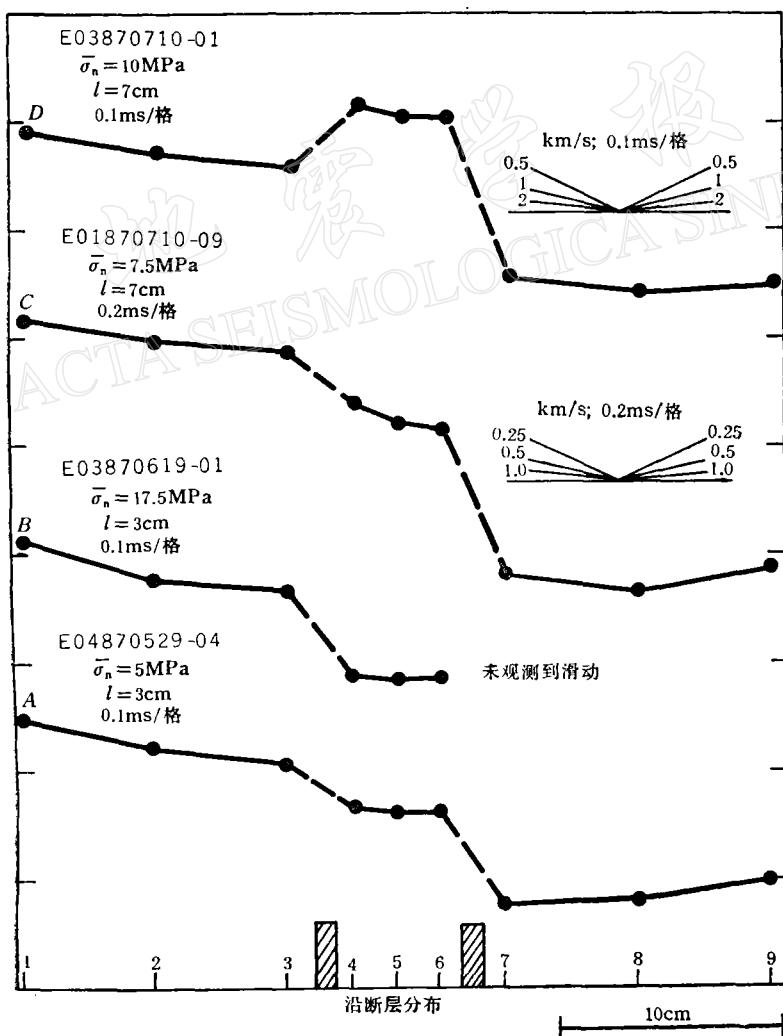


图 8 带锯口样品沿主断面失稳扩展时空图

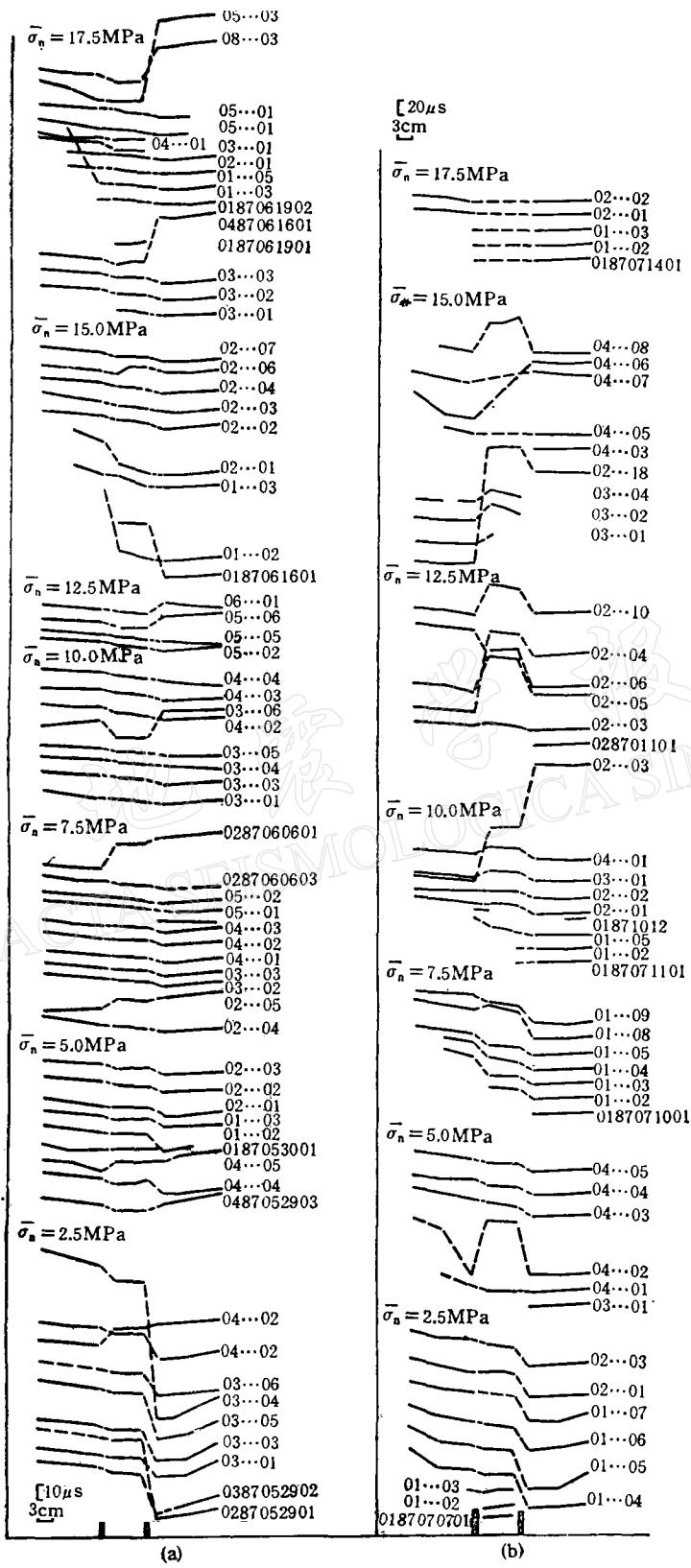


图 9 带锯口样品全部粘滑事件失稳扩展时空图

(a)  $l = 3\text{cm}$ ; (b)  $l = 7\text{cm}$

图 9(b)是  $l = 7\text{cm}$  的结果,但图中的时间纵座标不一致,6(b)图的分度值是6(a)图的2倍。从图中可以得到如下结论:

1. 滞后效应或止裂效应与  $l$  有关,  $l$  越长,其效应越明显;
2. 滞后效应或止裂效应明显依赖于平均正应力,  $\bar{\sigma}_n, \bar{\sigma}_s$  越大,效应越明显;
3. 止裂效应可能存在一个临界平均正应力,  $l = 7\text{cm}$  时,  $\bar{\sigma}_n$  仅为  $2.5\text{MPa}$ , 即在实验的起始值,便有明显的止裂现象出现;  $l = 3\text{cm}$  时,  $\bar{\sigma}_n \geq 12.5\text{MPa}$  时才有止裂现象出现;
4. 滞后时间不随  $\bar{\sigma}_n$  单调变化,  $l = 7\text{cm}$  时  $\bar{\sigma}_n = 5.0\text{MPa}$  时平均滞后时间  $\bar{t}_d$  最小,  $\bar{\sigma}_n = 2.5\text{MPa}$  时次小;而  $l = 3\text{cm}$  时,其平均滞后时间在  $\bar{\sigma}_n = 10.0\text{MPa}$  时最小,  $\bar{\sigma}_n = 7.5\text{MPa}$  时次小。表 1 是全部实验中平均滞后时间  $\bar{t}_d$  和止裂情况统计结果。 $\bar{t}_d$  指  $\bar{\sigma}_n$  一定时多次事件  $t_d$  的平均值;所谓止裂比例是  $\bar{\sigma}_n$  一定时多次事件中实际发生止裂次数与可能发生止裂的全部机会比值,因样品有两个锯口,每一次事件有两次止裂机会。

5. 事件发生的时空图象趋于复杂。本实验中所用样品只是在垂直于主断面的一侧增加两个锯口,如果把此模型视为带有构造格架的样品,充其量也是一种极为简单的模式化

表 1 平均滞后时间与止裂次数统计表

	$\bar{\sigma}_n (\text{MPa})$	2.5	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0	17.5
滞后时间 ( $\mu\text{s}$ )	$l = 3\text{cm}$	28.3	10.0	6.8	5.0	8.2	17.6	28.2
	$l = 7\text{cm}$	43.8	38.8	55.4	57.4	89.0	>100	
止裂比例	$l = 3\text{cm}$	0/24	2/20	0/24	0/20	4/18	4/18	11/30
	$l = 7\text{cm}$	6/18	8/24	8/14	8/18	7/14	16/20	10/10

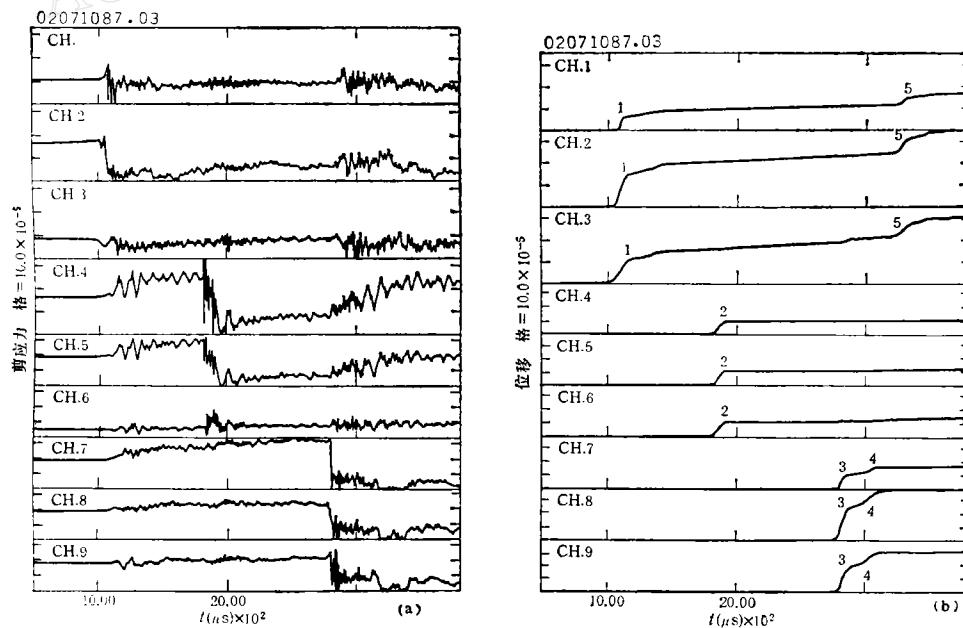


图 10 多次事件发生的实例

的典型构造而已,但即便如此,也可看到粘滑事件在时间空间分布上的多种复杂图象。图 10 是  $l = 7\text{cm}$   $\bar{\sigma}_s = 7.5\text{MPa}$  情况下的一个实验记录,采样间隔为  $2\mu\text{s}$ , 记录长度为  $4096\mu\text{s}$ 。在此时段内,我们可以明显看到共有五次事件发生。首先是位于样品一端的 1—3 点失稳滑动,然后中间断块在大约  $600\mu\text{s}$  后失稳滑动,  $1000\mu\text{s}$  后另一端的 7—9 点在不长时问内接连发生两次粘滑,其后在 1—3 点间又发一次粘滑。我们在图中标明了次序。

6. 软障碍体(锯口)的止裂机制可能不同于凹凸体的止裂机制。Kato 等<sup>[18]</sup>在做无锯口的单一断面样品的粘滑实验中,曾人为地在断面两侧各预制 2—3 个凹凸体,即使断面有几个起伏,起伏幅度为  $50\mu\text{m}$  左右。结果表明,突出部位在失稳滑动的扩展中具有明显的阻滞作用。根据剪应力和位移曲线,计算了沿断面各点的视破裂能  $G$ ,结果表明,阻止失稳扩展处前方往往是高能垒[图 11(a)],而带锯口的样品,其阻止失稳扩展的前方往往并不是高能垒,而阻止失稳扩展处的后方反而常是高能垒[图 11(b)]。

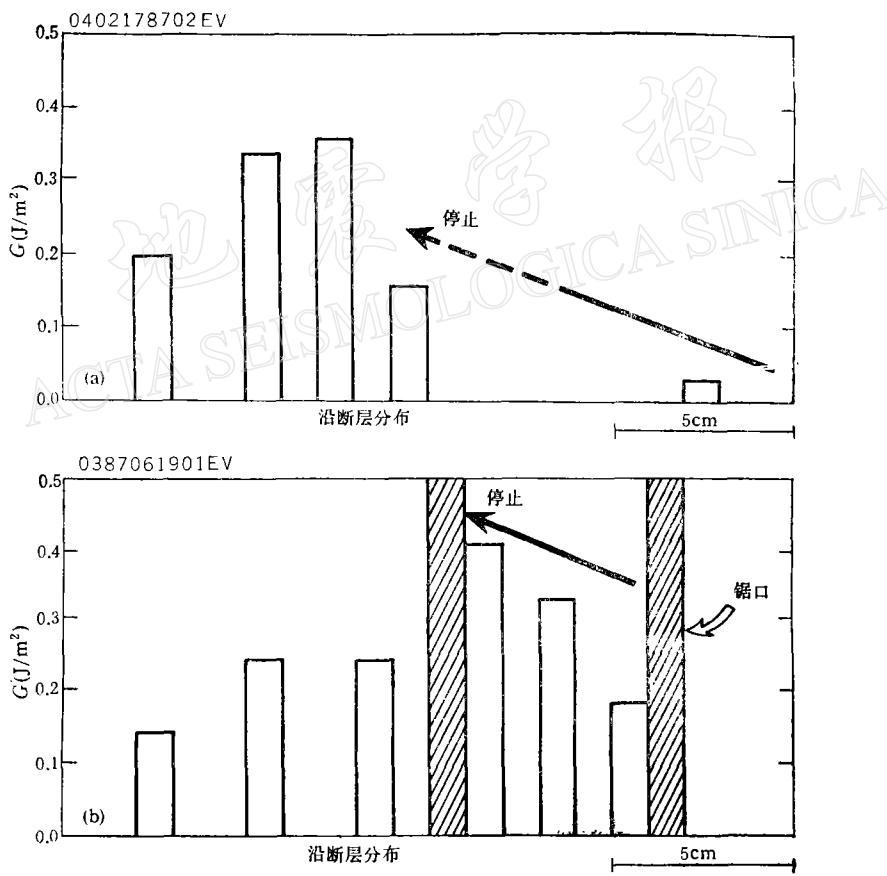


图 11 两类止裂机制的视破裂能分布

## 五、讨 论

在以往的粘滑实验中,基本上是研究在单一断面样品上的粘滑过程,往往是对单一粘滑事件的各种特征加以研究。这种实验对人们认识粘滑过程各阶段的细节特征提供了大

量的有价值的成果,使人们对地震破裂过程有了更深刻的认识。但这种实验的局限性也是不言而喻的。首先,这种单一断面样品和实际情况相差甚远,实际的地质构造总是带有复杂格架的,分支构造的存在无论是在均匀性方面还是在边界条件方面均与单一断面样品有本质上的差异,很可能它们的存在正是地震发生和终止的介质条件。本实验的目的之一正是基于这一认识而加以设计的。本实验样品中的两个锯口,可以模拟两条支断层,其断层物质当然是一种极端软弱的特例,尽管进一步的实验需要对不同强度的断层物质加以研究,但从本实验结果中已经清楚地看到了这种复合构造格架样品与单一断面样品在破裂(或称粘滑)的成核阶段,稳态扩展阶段,失稳阶段及停止阶段中的明显区别,而这样的结果更接近实际的地震过程。同时,单一断面样品实验中难以对事件之间的时空关系加以研究。我们知道,地震的序列特征不仅是认识地震过程的重要信息,同时也是地震预报中的一大支柱。在本实验中,一个重要结果就是除展示了每一事件的细结构外,还给出了一些事件间在时间和空间上的图象。这些结果对认识地震的序列特征和空间特征无疑是极有帮助的。当然,本实验仅仅是构造格架中最简单的一种,诸如对断面间夹角,支断层厚度和长度,断层物质,断面平整度和粗糙度等因素均需细致研究。

本实验在一定程度上证实了软障碍体在止裂过程中的作用,尤其是发现在失稳扩展的停止前方其视破裂能  $G$  往往低于停止后方的结果或许具有更为重要的物理意义。如果我们把失稳扩展被高  $G$  阻滞称为高能壁垒作用的话,那么这种非高  $G$  阻滞扩展的作用很可能是一种对应变能的吸收作用。从阻滞作用强烈依赖  $I$  和  $\sigma$ ,这一现象上似乎也说明这一点。样品被两锯口所夹块体实际为一刚性并不很大的舌状物。粘滑过程中这一舌状物可以弯曲变形,而这种变形是依赖于  $I$  和摩擦阻力的。这种变形吸收破裂能并将其转化为形变能贮集起来,从而达到阻滞作用。

如前所述, Kanamori 和 Aki 先后提出了凹凸体(asperity)模式和障碍体 (barrier) 模式,两者在其含义上和强调的重点上尽管有所不同,但两者在强调介质的非均匀性的作用方面还是一致的。本实验结果和 Kato 等<sup>[18]</sup>的结果似乎从不同角度证实了介质非均匀性在阻滞失稳扩展中的作用。或许对这一问题的深入研究,能使我们对非均匀性这一重要因素有更为深刻的认识。

本课题得到地震科学联合基金的部分资助。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] Brace, W. F. and Byerlee, J. D., 1966. Stick-slip as a mechanism for earthquakes. *Science*, **153**, 990—992.
- [ 2 ] Byerlee, J. D. and Brace, W. F., 1968. Stick slip, stable sliding and earthquake-effect of rock type, Pressure, strain rate and stiffness. *J. Geophys. Res.*, **73**, 6031—6037.
- [ 3 ] Wong, T. F., 1986. On the normal stress dependence of the shear fracture energy. *Maurice Ewing Ser.*, **6**, 1—12.
- [ 4 ] Brace, W. F., 1972. Laboratory studies of stick-slip and their application to earthquakes. *Tectonophysics*, **14**, 189—200.
- [ 5 ] Stesky, R. M., Brace, W. F., Riley, D. K. and Robin, P. Y. F., 1974. Friction in faulted rock at high temperature and pressure. *Tectonophysics*, **23**, 177—203.
- [ 6 ] Johnson, T. L., Wu, F. T. and Scholz, C. H., 1973. Source parameters for stick-slip and for earthquakes. *Science*, **179**, 278—280.
- [ 7 ] Johnson, T. L. and Scholz, C. H., 1976. Dynamic properties of stick-slip friction of rock. *J. Geophys. Res.*,

- 81, 881—888.
- [8] Ida, Y., 1972. Cohesive force across the tip of a longitudinal-shear crack and Griffith's specific surface energy. *J. Geophys. Res.*, **77**, 3796—3805.
- [9] Ida, Y., 1973. The maximum acceleration of seismic ground motion. *Bull. Seism. Soc. Am.*, **63**, 959—968.
- [10] Okubo, P. G. and Dieterich, J. H., 1981. Fracture energy of stick-slip events in a large scale biaxial experiment. *Geophys. Res. Lett.*, **8**, 887—890.
- [11] Okubo, P. G. and Dieterich, J. H., 1984. Effects of physical fault properties on frictional instabilities produced on simulated faults. *J. Geophys. Res.*, **89**, 5817—5826.
- [12] Andrews, D. J., 1976. Rupture velocity of plane strain shear crack. *J. Geophys. Res.*, **81**, 5679—5687.
- [13] Ohnaka, M., Kuwahara, Y., Yamamoto, K. and Hirasawa, T., 1986. Dynamic breakdown processes and the generating mechanism for high-frequency radiation during stick-slip instabilities. *Maurice Ewing Ser.*, **6**, 13—24.
- [14] Kanamori, H. and Stewart, G. S., 1978. Seismological aspects of the Guatemala earthquake of February 4, 1976. *J. Geophys. Res.*, **83**, 3427—3434.
- [15] Aki, K., 1979. Characterization of barriers on an earthquake fault. *J. Geophys. Res.*, **84**, 6140—6148.
- [16] Kuwahara, Y., Ohnaka, M., Yamamoto, K., Kato, N. and Hirasawa, T., 1986. Rupture initiation process in stick-slip instability. *Abstract, Fall Annual Meeting of Seism. Soc. Japan*, **2**, 233.
- [17] Kuwahara, Y., 1985. An experimental study on dynamic sliding process during stick-slip and its implication to earthquake faulting. Ph. D. Thesis, Tohoku University.
- [18] Kato, N., 1987. Effects of the nonuniformities of sliding surfaces on the dynamic behavior of shear instability. Ph. M. Thesis, Tohoku University.

## RESEARCH ON THE EFFECTS OF STOP OR DELAY, WHICH LATERAL FAULTS INFLUENCE UPON MAIN FAULT IN THE UNSTABLE EXTENDING PROCESS OF STICK-SLIP

LU ZHENYE

(Center for Analysis and Prediction, State Seismological Bureau)

N. KATO, K. YAMAMOTO and T. HIRASAWA

(Faculty of Science, Tohoku University, Japan)

### Abstract

The laboratory results of stick-slip of a fault with weak barrier were presented in this paper. The weak barriers were simulated by two isolated saw kerfs which meet at right angles with the sawcut representing the fault. The results show that the weak barriers obviously can stop (or called stop-fracture) or delay the unstable stick-slip extending process. The stop-fracture effects depend on the depth  $l$  of the saw kerf and average normal stress  $\sigma_n$  which exert on the saw cut representing the main fault. The effects of stop and delay increase with  $l$ , and increase with  $\sigma_n$  but not monotonously. The average delay time  $\bar{t}_d - \bar{\sigma}_n$  curve is like a "V" shape. The spatial distribution of apparent fracture energy,  $G$ , plotted against distance along the main fault shows that there is no high  $G$  in the front of the stop points in the unstable extending process, which indicates that the weak barrier is another stopbreak mechanism. It may stop or delay the unstable extending process of stick-slip by absorption of strain energy. The results show some complex time and space features of stick-slip events under conditions represented in this sample, which can help us understand the relation between strong earthquake sequences. Further research on the stop or delay effects of the extending process can help us perfect the stick-slip mechanism in seismology.