

断层几何结构与物理场的 演化及失稳特征^{*}

马 瑾 马胜利 刘力强 邓志辉 马文涛 刘天昌

(中国北京 100029 国家地震局地质研究所)

摘要 在双轴加载条件下,研究了几种具不同几何结构的断层系变形破坏过程中应变、断层位移和声发射事件的时空分布,并对典型失稳事件的特征进行了分析.研究表明:具不同几何结构的断层系有不同的变形物理场演化图象;根据物理场演化特征和变形机制的差异,可识别出两类粘滑型失稳、破裂型失稳及混合型失稳,不同类型的失稳在前兆上有明显差异;失稳类型与断层几何结构及变形阶段密切相关.因此,研究自然界断层的几何结构,对地震预报和地震前兆观察研究极为重要.

主题词 岩石力学实验 断层组合 声发射 应变 断层位移

引言

浅源地震与地壳中断层的活动密切相关.在大多数情况下,断层并不是简单连续的面状构造,而是复杂不连续的断裂组合带.理论分析表明,断层几何结构的非连续会引起应力场的复杂变化(Segall, Pollard, 1980);实际震例表明,地震破裂的成核、扩展以及终止常受断层几何结构的影响(Sibson, 1986; Scholz, 1990);断层几何结构的复杂性使得变形破坏过程复杂化,必然引起地震前兆分布的复杂性(马瑾, 1987).因此,研究具不同几何结构的断层系的变形破坏及物理场演化过程,对理解地震机制和前兆是很有意义的.由于构造运动是十分缓慢的过程,仅依赖于野外观测资料,常难以了解断层的变形及物理场演化过程.而岩石力学模拟实验可在此方面提供有价值的参考资料.

对平直断层(Dieterich *et al.*, 1978; Mogi, 1984; 马瑾, 1987)、雁列断层(刘力强等, 1986; 李建国等, 1989; 张之立, 李强, 1993)、“入”字型(杜异军等, 1991)及其它典型断层组合(马瑾, 1987)变形过程中应变、断层位移、声发射等物理场的演化都曾进行过实验研究,从中可以看出断层几何结构对破坏方式和前兆分布等的影响.但从加载方式来看,许多实验是在单轴条件下进行的,未能揭示变形破坏的全过程;从物理场观测手段来看,大多数实验采用的是模拟记录,观测的精度和速度及观测项目的综合性都有限.近年来在利用多通道数字式观测设备研究断层变形物理场(前兆场)方面取得了一些新结果(大中康誉等, 1993; 佐藤隆司等, 1993; 加藤尚之等, 1993),但断层模型较为简单.因此,对断层几

^{*} 国家地震局“八五”攻关课题.

1995-11-03 收到初稿, 1995-11-14 决定采用.

何与物理场演化及失稳前兆关系的深入理解仍需大量的实验结果。

本文选择走滑断层带中常见的几种组合方式为实验模型，利用一套高精度、多通道数字式测量系统，在双轴加载条件下研究其变形破坏过程中应变场、断层位移场、声发射事件时空强分布的演化，据此讨论断层几何结构与失稳类型及前兆特征的关系。

1 实验方法

实验采用的加载装置为一套双轴加载系统，利用不同的压块组合可进行双剪实验、双轴摩擦实验及双轴压缩实验。

所研究的模型包括平直断层，拐折断层，挤压型、拉张型及由两者组合而成的雁列式断层以及共线非连续断层等。各类标本特征、实验类型及实验条件汇于表 1。

表 1 标本结构、实验条件一览表

断层类型	标本结构	标 本 特 征	实 验 条 件
平直断层	花岗闪长岩，人工研磨摩擦面，滑动面积 28×5 cm		正应力 5~10 MPa，位移速率 1 μm/s
拐折断层	辉长岩，25×25×2 cm，含 5°拐折，人工研磨摩擦面		侧向应力 5~10 MPa，轴向位移速率 0.5 μm/s
挤压型雁列断层	辉长岩，25×25×2 cm，雁列区 2×2 cm，断层带宽 3 mm，石膏充填		侧向应力 5 MPa，轴向压缩速率 0.5 μm/s
拉张型雁列断层	辉长岩，25×25×2 cm，雁列区 2×2 cm，断层带宽 3 mm，石膏充填		侧向应力 5 MPa，轴向压缩速率 0.5 μm/s
复杂雁列断层	两个雁列区，辉长岩，25×25×2 cm，雁列区 2×2 cm，断层带宽 3 mm，石膏充填		侧向应力 5 MPa，轴向压缩速率 0.5 μm/s
共线非连通断层	辉长岩，25×25×2 cm，非连通段 2.5 cm，断层带宽 3 mm，石膏充填		侧向应力 5 MPa，轴向压缩速率 0.5 μm/s

实验中除对轴向载荷和轴向位移进行测量外，在实验标本上布设了声发射传感器、应变片和断层位移计，对相应的物理场进行观测。

声发射观测采用两套高速多通道(共 24 通道)测量系统。根据声发射探头的全波形记录，利用同一事件的到时差可确定其位置；声发射强度的确定借鉴了计算地震震级的方法，并考虑到声发射事件与地震之间的差别。由此可得到每个标本变形过程中声发射 $M-t$ 图及时空分布图，还可分析声发射事件的频谱、震源机制解等。

应变测量使用一套低频、高精度多点测量系统，观测通道为 32 个，传感器为标准应变片。可直接利用单个应变片的测量记录给出所在部位及方向应变随时间的变化，也可将相邻三个应变片组成一个应变花，求出某一点平面主应变的大小、方向及随时间的变化。断层位移观测使用的也是前述低频、高精度多点测量系统，设置了 8 个断层位移计，可直接利用每个通道的记录给出相应位置上断层位移的时程曲线。

2 实验结果

2.1 典型断层构造的变形过程及物理场演化

平直断层 以沿断层面的滑动为主(位移大)，应变积累限于断层面附近，声发射事件

能量大但事件数目相对较少,摩擦阻力总体上处于稳态,物理场的演化也较平稳,只在失稳前后有明显的变化。

拐折断层 拐折的存在对断层活动有明显的阻碍作用,使得与轴向应力呈较小和较大角度的断层段交替成为主导活动构造。表现为断层位移变化相对较快,断层附近应变积累和释放较剧烈,声发射活动较强。拐折部位的声发射事件往往较小,主频较高,平直断层段上事件往往较大,主频较低。

雁列式断层 挤压型和拉张型两类雁列式断层具有类似的变形破坏过程,即:前期以雁列区内裂纹的产生、扩展、连通为主,应变变化剧烈而断层位移较小,声发射活动频度较高而能量相对较小;后期以沿断层带的滑动为主,断层位移明显,应变变化相对较小,声发射事件能量较大。但挤压型雁列区可积累较高的应变能,区内可发生较强的应变释放和声发射活动,且雁列区对滑动始终起着阻碍作用;而拉张型雁列式断层雁列区内难以产生快速的应变释放和较强的声发射活动,雁列区对后期的滑动无明显的阻碍作用。

复杂雁列式断层的变形过程及相应的物理场演化并非是两种雁列式断层的简单叠加,而是包含着它们之间的相互作用。其中一个有趣的现象是,能量较强的声发射事件主要分布在应力水平较低的张性雁列区附近的主干断层上,而不是应力水平较高的压性雁列区,但这种事件发生的时间则明显受控于压性雁列区的变形过程。

共线非连通断层 具有很高的强度,尽管断层端部可能会引起局部应力高度集中,但共线断层的扩展连通极为困难,其变形主要集中在非连通部位及邻近的断层上,以产生大量能量不高的声发射活动为特征。

2.2 失稳类型及前兆特征

实验中观察到具不同特征的失稳事件,根据其对应的变形机制和物理演化场特征,可分为粘滑型、破裂型和混合型失稳。失稳类型与断层几何结构有关,不同类型的失稳对应不同的失稳前兆特征。基于对典型失稳事件的分析,将各类失稳的特点及前兆特征简述如下。

粘滑型失稳 在断层滑动过程中出现的失稳,可见于平直断层、拐折断层的滑动中及雁列式断层雁列区贯通后的滑动中。从失稳前后物理场的演化特征来看,至少可识别出两类不同的失稳事件:一类失稳是断层在稳态滑动中由于滑动面状态的变化而造成局部闭锁,使得摩擦阻力上升,当应力增加到一定水平时,局部闭锁被打破,发生失稳扩展。基于断层摩擦本构关系,其机制可能属滑动弱化(Rice, 1980)。这类失稳的前兆特征是:宏观应力上升,闭锁部位附近应变明显增加,断层位移速率下降,临近失稳时则有预滑现象。图1是平直断层摩擦滑动中这样一次失稳发生前后断层各段位移和应变的变化情况,粘滑发生前源区断层闭锁、应变增加及临近粘滑时的预滑(位移加快)现象均很明显;另一类失稳是断层在稳态滑动中由于整体加速或局部加速并快速扩展引起应力下降而造成的,其机制可能属速度弱化(Dieterich, 1979; Ruina, 1983)。这类失稳难以观测到前兆。图2是断层摩擦滑动中一次失稳发生前后断层各段位移和应变的变化情况。失稳前仅见应变的瞬时增加,紧临失稳断层位移有加速扰动现象。

破裂型失稳 由断层带中强度较高的非连续部位次级断裂的扩展引起的失稳,可见于挤压型雁列区、共线非连续断层等部位,一般发生于变形初期。失稳前宏观应力上升,紧临失稳源区应变明显下降,而邻区应变上升。

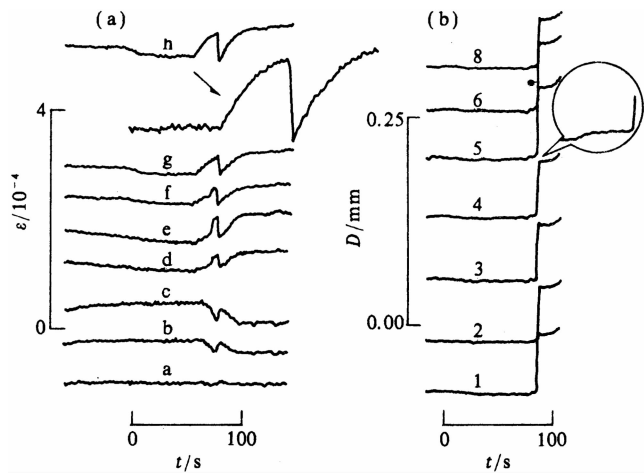


图 1 断层摩擦滑动中一种粘滑失稳前后应变和断层位移的变化

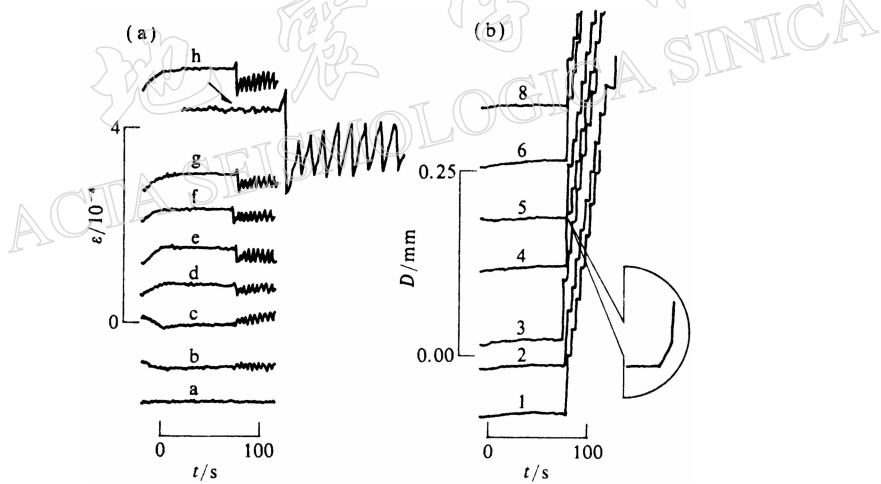


图 2 断层摩擦滑动中另一种粘滑失稳前后应变和断层位移的变化

图 3 是挤压雁列区一条裂纹(Ⅰ)的快速扩展引起的失稳前后各种观测参数的变化。宏观应力失稳前几十秒加速上升；断层一些部位位移在失稳时有突变，但失稳前变化不明显；由于仪器频响的原因，声发射主事件可能被漏记，但从声发射序列来看，前兆性事件不多，而类似于余震的事件较多；失稳时的应变释放主要集中在裂纹处及断层外侧，失稳前裂纹附近应变下降明显，而其外应变上升。

混合型失稳 这类失稳见于不连续断层贯通时(如雁列区的贯通)。次级断裂的扩展使得断层非连续部位被贯通，导致断层发生整体错动而失稳。失稳前兆极为丰富：源区应变先升后降，邻区则正相反；源区断层先闭锁后预滑，区外断层加速运动；源区及附近声发射活动频度明显增加。

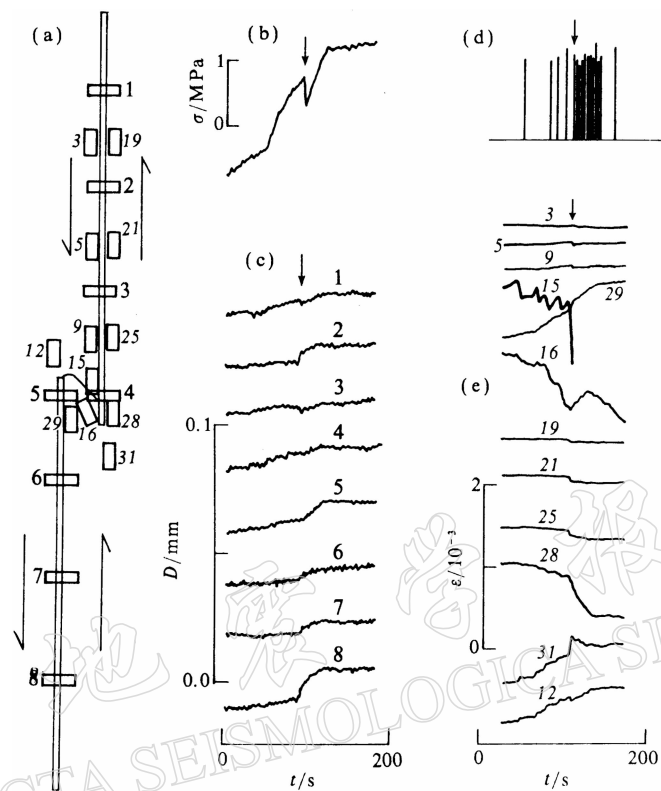


图 3 挤压型雁列区破坏过程中一次失稳前后各种观测参数的变化
(a) 断层结构及传感器分布; (b) 应力; (c) 断层位移; (d) 声发射; (e) 应变

图 4 是挤压型雁列式断层雁列区贯通引起的失稳前后各种观测参数的变化. 失稳前约 100 s 宏观应力开始增加, 紧临失稳下降; 失稳前远离雁列区的段落表现为位移加速, 而靠近雁列区的段落表现为先反向, 后加速; 声发射前兆明显(主事件可能被漏记); 由应变测量结果来看, 失稳发生在裂纹(Ⅱ)的扩展贯通之后, 应变释放区主要为雁列区下部(29 号)及外侧(12, 31 号). 失稳前这些区域尤其是 29 号部位应变先加速上升、紧临失稳却较快地下降, 其它部位应变的变化趋势则正相反.

3 讨论

3.1 断层几何结构与地震活动

基于实验结果, 对断层几何结构与地震活动关系简单分析如下:
在较长的平直断层段, 可发生由粘滑引起的强震. 其中一类是断层在滑动中局部闭锁, 当应力增加、局部闭锁被打破而发生的失稳. 这类地震前在“源区”附近可观察到应变增加、断层位移速率下降、微震活动加强及临近失稳时断层有预滑等前兆现象; 还有一类是断层整体加速滑动或局部加速滑动并沿断层扩展、引起应力下降而造成的失稳, 这类失稳不易观察到前兆. 小角度拐折的存在将使其两侧的断层交替成为主导活动构造, 可综合微震活动、断层位移及应变资料来判断.

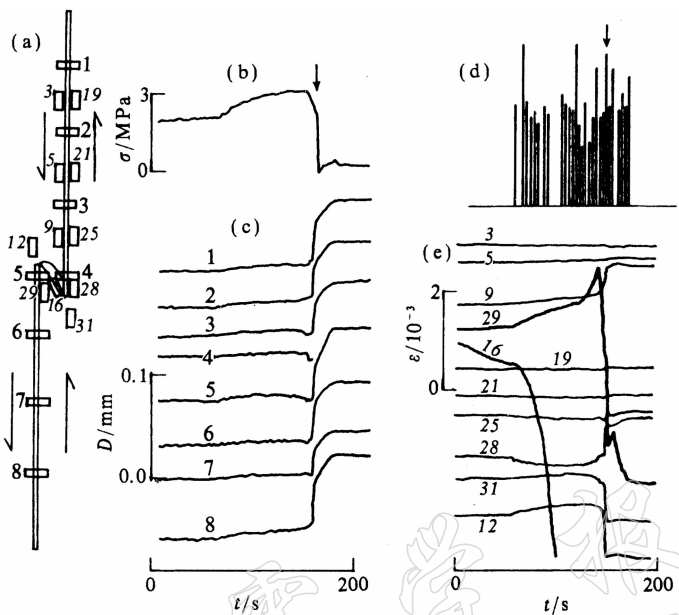


图 4 挤压型雁列区贯通失稳前后各种观测参数的变化
(a) 断层结构及传感器分布；(b) 应力；(c) 断层位移；(d) 声发射；(e) 应变

在断层带具有较高强度的非连续部位，如挤压型雁列区、共线非连通断层非连通区及一些断层交汇部位(杜异军等，1991)，次级断裂可引起中强地震，地震前应变场有前兆性变化，即次级断裂附近(源区)应变明显下降，邻区应变上升。而强度较低的非连续部位，如拉张型雁列区等，次级破裂仅会引起小地震。

非连续断层的贯通，如雁列区的贯通、一些“入”字形断层交汇部位的贯通等，可引起强震。这类地震前兆现象较为丰富，总的特点是雁列区或交汇区附近断层闭锁，区外断层活动加速，微震活动频度增加；“源区”应变先明显增加，紧临失稳时下降，而区外应变变化复杂，与构造部位有关。不过，一些非连续断层贯通强度极高，如共线非连通断层及某些“入”字形断层交汇部位，在自然界可能难以完全贯通，不会发生大震，但这些部位的微震活动对应力很敏感，其微震活动的增加可作为区域应力增强的标志。

强度较高的非连续部位的变形对断层带的变形有一定的控制作用，这些部位的破坏可为两侧断层的滑动失稳提供必要的让位条件。因此，一条断裂带地震活跃期可能会从这些部位开始。另一方面，这些部位对断层运动有长期的阻碍作用。因此，在贯通前和贯通后都可能会阻止发生于其两侧的地震破裂的扩展。而低强度的非连续部位对断层运动的阻碍作用是暂时的，只是在其贯通前可能会阻止发生于其两侧的地震破裂的扩展。

实际断层带常是上述典型构造的复杂组合，在统一的应力作用下必然会表现出复杂的变形和失稳过程，但在了解构造条件、应力背景的前提下，通过对实验、野外观测资料的综合分析，有可能对其未来的变形破坏特征(包括未来的发震地点、失稳类型及相应的前兆场特征)进行分析、推断。

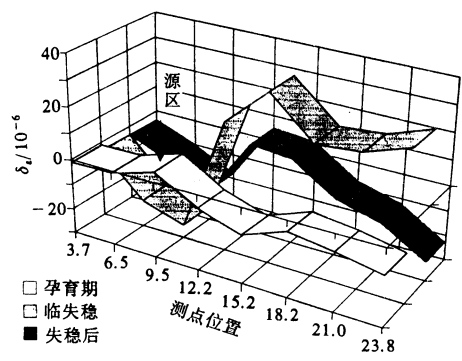


图 5 一次粘滑失稳前后平均应变的变化

3.2 地震前兆机理与断层几何

实际震例表明，地震前兆是相当复杂的，“普适性”和“地区性”共存，地震前兆机理仍是有待于探讨的问题(梅世蓉，冯德益，1993)。我们根据实验结果对地震前兆机理作一些讨论。

对有应变前兆的粘滑型、混合型失稳事件的分析表明，在失稳孕育过程中，“源区”与邻区存在着应变调整，其特点是“源区”附近在“孕育期”应变增加明显，“临近失稳”前下降；而邻区表现出相反的趋势。从图 5 所示断层摩擦滑动过程中一次粘滑失稳前后平均应变的变化(相对于失稳前某一时间)可清楚地看出这种特点。这说明应

变前兆的产生，实际上是“源区”与邻区相互作用的结果，即失稳前首先是邻区滑动或破裂，应变下降，而“源区”相对闭锁，应变增加；当应变增加到一定程度时，“源区”开始滑动或破裂，应变开始下降。对滑动弱化型粘滑失稳，表现为闭锁区与滑动区的相互作用；对混合型失稳，表现为次级断裂与主断层的相互作用。如果失稳孕育过程中没有这种相互作用，就难以出现应变前兆。由此可见，断层宏观或微观几何结构的不均匀是出现应变前兆的重要条件。

声发射(微震活动)前兆与失稳前“源区”外围应变的释放和临近失稳前“源区”应变的释放有一定的对应关系。不过，应变的释放并不一定都对应有声发射，只有较快的应变释放才会有声发射。在混合型失稳前，与破裂扩展相伴的应变释放和“源区”紧临近失稳前的应变下降均对应有声发射(参见图 4)；在滑动弱化型粘滑中，失稳前“源区”外断层的活动和

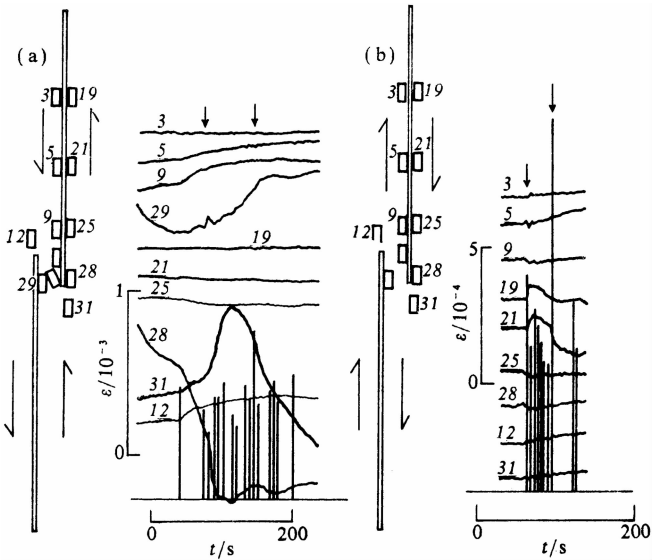


图 6 雁列式断层滑动过程中失稳事件前后的声发射和应变变化

(a) 挤压型雁列式断层；(b) 拉张型雁列式断层

“源区”临近失稳时的应变下降也常可引起声发射, 在图 6 所示的雁列式断层滑动过程中, 两次粘滑失稳事件前可清楚地看到这种对应关系. 由此可见, 微震前兆的出现也与构造变形的不均匀有关.

断层位移前兆的出现与几何结构直接相关. 挤压型雁列区次级破裂引起的破裂型失稳无位移前兆, 而两类雁列区完全贯通引起的混合型失稳均有明显的位移前兆; 速度弱化型粘滑失稳位移前兆不明显, 而滑动弱化型粘滑失稳前断层闭锁区预滑明显. 可见, 断层位移前兆实际上是失稳孕育过程中断层运动差异的表现. 因此, 参与失稳的断层几何结构的不均匀有利于位移前兆的出现.

总之, 断层几何结构对地震前兆有重要的影响. 几何结构愈复杂, 参与失稳过程的构造部位愈多, 则前兆种类愈多, 现象愈复杂.

参 考 文 献

- 杜异军, 张大伦, 马瑾, 刘力强, 1991. “入”字型断层的变形与破坏特点. 现代地壳运动研究(5). 北京: 地震出版社. 188~198
- 李建国, 石柱梅, 马瑾, 1989. 雁列裂纹交接区破坏特征与失稳型式研究. 现代地壳运动研究(4). 北京: 地震出版社. 149~155
- 刘力强, 马瑾, 吴秀泉, 1986. 雁列式断层变形与失稳过程的实验研究. 地震学报, **8**(4): 393~403
- 马瑾, 1987. 构造物理学概论. 北京: 地震出版社. p. 450
- 梅世蓉, 冯德益, 1993. 中国地震预报概论. 北京: 地震出版社. p. 498
- 张之立, 李强, 1993. 断裂系扩展过程与地球物理场变化特征的实验研究. 地球物理学进展, **8**(4): 225~231
- 大中康誉, 吉田真吾, 沈林峰, 望月裕峰, 1993. すべり破損核形成過程とMicroseismicity. 日本地震学会講演予稿集(2). 东京: 日本地震学会. p. 298
- 加藤尚之, 佐藤隆司, 山本清彦, 平泽朋郎, 1993. 折れ曲がりのある断層上で発生する多重不安定すべり(1)(2). 日本地震学会講演予稿集(2). 东京: 日本地震学会. p. 296
- 佐藤隆司, 加藤尚之, 雷兴林, 1993. 折れ曲がりのある断層上で発生する多重不安定すべり(1). 日本地震学会講演予稿集(2). 东京: 日本地震学会. p. 295
- Dieterich J C, Barbar D, Conrad G *et al.*, 1978. Slip in a large scale friction experiment. *Proceedings of the 19th U S Rock Mechanics Symposium*. University of Nevada-Reno. 110~117
- Dieterich J C, 1979. Modeling of rock friction: 1. Experimental results and constitutive equations. *J Geophys Res*, **84**(B5): 2 161~2 168
- Mogi K, 1984. Fundamental studies on earthquake prediction. *A Collection of Papers of International Symposium on ISCSEP*. Beijing: Seismological Press. 375~402
- Rice J, 1980. The mechanics of earthquake rupture. In: Dziewonski A M and Boschi E (eds), *Physics of the Earth's Interior*. Bologna: Italian Physical Society. 555~569
- Ruina J H, 1983. Slip instability and state variable friction laws. *J Geophys Res*, **91**(B9): 9 452~9 472
- Scholz C H, 1990. *The Mechanics of Earthquake and Faulting*. New York: Cambridge University Press. p. 438
- Segall P, Polland D, 1980. Mechanics of discontinuous faults. *J Geophys Res*, **85**(B8): 4 337~4 350
- Sibson R H, 1986. Rupture interaction with fault jogs. In: Das S, Boatright J and Scholz (eds), *Earthquake Source Mechanics*. AGU Geophys Mono, **37**: 157~168