

重力滑动过程中蠕滑和松弛因素的作用及其与地震的关系

阎海歌

(山西省地震局)

摘 要

本文根据岩体自身的力学性质及其变化,讨论了具有挤压特征的正断层的成因。认为这些断层的形成有岩体本身的重力作用,同时也有应力松弛现象。岩体中的应力松弛现象是由流变学因素和非流变学因素引起的。由于松弛后岩体沿断层面滑动过程中,仍受到一定的挤压作用,因此易于出现粘滑现象,从而易于发生地震。

一、引 言

一般认为,正断层是引张作用的产物。但是,笔者在野外的实际工作中,常见到一些具有挤压特征的正断层,它们一般倾角较陡,而且它们的产状所反映的应力作用方式与区域应力场相矛盾。如果仔细研究,就会发现它们有些是由逆断层反向活动造成的。

笔者根据岩体本身的力学性质及其可能发生的变化,讨论了产生这类断层的原因及其与地震的关系。

二、岩体的力学性质作用

1. 岩体自身重力的直接作用

(1) 自重对构造软弱带的作用

岩体在自身重力的作用下,对其两侧的构造软弱带(一般是断裂破碎带)进行不断地挤压和剪切,由于软弱带中物质的抗形变能力很弱,从而岩体将向下滑动。并且,断层倾角愈

大，岩体下滑幅度愈大。当岩体两侧断裂破碎带很宽时（有的可达数公里），其下沉幅度将会更大。

这种岩体沿其两侧的构造软弱带在自身重力的作用下发生下滑的情况只有在垂直于构造软弱带方向上的水平挤压较弱或相对没有的情况下才可能发生，否则岩体在自身重力的作用下不会发生向下的滑移运动。

在实际的地质环境中，地下水的化学作用是不可忽视的。一般沿断层带都有水的渗入，破碎带中的物质在渗压水流的长期作用下，会发生蚀变、软化和泥化等现象。在这种情况下断层破碎带中的物质更易于变形，从而岩体下滑的幅度也将增大。

（2）自重对岩体内部的影响

当岩体的重力长期作用在断层带上时，同样会引起滑动岩体的内部发生压剪性蠕变，这个现象在靠近边界处最为发育。岩体重量愈大，这种蠕变现象愈发育。蠕变受温度的影响也是很明显的，一般盆地内的热流值较高，并且沿断裂带常有较高的地热流，尤其是深部断裂构造，更是地热流的良好通道，所以在盆地内部或在断裂带附近蠕变现象发育。

2. 岩体中的应力松弛现象

（1）流变学性质的松弛作用

在实验构造地质学中，松弛现象被认为是由任何一种蠕变过程而产生的使所施应力随时间的前进而释放的情况。这些蠕变形式包括破裂作用、双晶滑动、平移滑动、重结晶（涉及到颗粒生长、扩散和相变）和粒间滑动等。在低温下，脆性岩石的蠕变形式主要是随时间而产生的微破裂。

一般在较低温度下，经过压应力的长期作用，会发生溶解运移蠕变。这个过程是由矿物晶体表面的化学势梯度变化引起的，化学势

$$\mu = \mu_0 + \sigma_n V + \frac{1}{2} \sum \sigma_{ij} \epsilon_{ij} V_0。$$

式中 μ_0 为无应力状态下的化学势， σ_n 为晶体表面所受的正应力， V 和 V_0 分别是受应力作用和无应力状态下晶体的体积度，式中最后一项为晶体的弹性应变能。由公式可以看出，受压应力作用时，晶体的与压应力作用方向垂直的表面上的化学势高，从而被溶解，与压应力平行的晶体表面上的化学势较低，因而产生重结晶。这个过程相当于使晶粒产生了压扁变形。在一些挤压断层带上，常可见到矿物晶体的生长方向平行于断层面便是这个原因。这一变形过程可引起应力松弛，当有充分的地下水参与时，更有利于这一过程。在岩体内部，由于空间和渗流水作用不充分等原因，这一现象不如在断层带中发育。

相变也可以引起应力松弛。这是由于在一定的温度和压力作用下，矿物向体积减小的方向发生相变的结果。

影响松弛过程的因素主要是地下水和温度。水的化学作用可以降低岩石的强度，据有关资料介绍^[1]，有些岩石在富水时，其强度会降低到干燥岩石的50~75%，这样自然会加大岩石的变形速率。在地下水的动水压力作用下，岩体内也会发生一些塑性流变。温度增高可使松弛的过程明显加快，所以，在一些地表热流值较高的地区，尤其是在有地下热液活动的区域，岩体中的应力松弛现象将会大大加快。

（2）非流变学性质的松弛作用

除了岩体的流变学性质以外，岩体的体力的变化也能引起应力松弛现象。在这方面起作用的体力主要是流体力、地震力和温度变化引起的附加力。本文把由岩体力变化而产生的

松弛作用称为非流变性的松弛作用。

岩体中孔隙水压是其体力的一个成份,当孔隙水压降低时,便可认为该岩体发生了松弛现象。美国学者Rundle和Jackson认为〔9〕,在浅层岩体中的应力松弛现象与地下水的流动有关。

岩体中的应力是由于岩石产生弹性变形引起的,而地震的发生能把这种弹性应变能快速释放掉,因此可以导致岩体中的应力产生松弛。如强震震中附近地区的应力值低,而离开震中地区应力值增高以及震后的应力降现象和震中区的下沉现象等都是发生了应力松弛的反映。

在区域应力场的作用下,岩体在遭受强烈挤压的同时,温度也会升高,尤其是当伴有岩浆活动时,岩体所处的环境的温度会更高。在这种情况下,膨胀岩体因受到边界的限制,在其体内会产生出一附加应力。随着温度的降低,这一附加应力便逐渐消失。温度的增高也可以加快岩体的松弛作用。因此,温度可以从多方面来影响岩体中的应力松弛。

三、岩体的力学性质变化与地震的关系

1. 岩体在自重作用下的滑动与地震

一般随着岩体的下滑,断层带中的物质被压密、胶结并老化,致使下滑逐渐停止下来,这时的岩体大都处于暂时平衡的状态。其判断公式为:

$$K = \text{ctg}\alpha \cdot \text{tg}\phi + (2c/\gamma \cdot D \cdot \sin\alpha)。$$

式中 α 为断层倾角; ϕ 和 c 分别为断层破碎带内物质的内摩擦和粘结力; γ 为岩石的容重; D 为岩体的宽度。当 $K > 1$ 时,岩体不能滑动;当 $K < 1$ 时,则可以滑动;岩体处于暂时平衡状态时 $K \approx 1$ 。如果周围条件发生变化,岩体所处的暂时平衡状态便被破坏,岩体就会突然再次发生滑动,产生地震。区域应力场的变化以及一些人为的因素,如修建水库等都可以促使岩体沿着断层再次发生类似粘滑性质的运动,引起地震。

水的作用对滑动岩体的活动影响很大。有水参与时,有利于岩体滑动;缺水时,岩体不易发生滑动。因此,区域降水量的较大波动可以与地震活动有一定的相关性。据文献〔11〕报导,地震活动频度的峰值与地下水位变化的高峰或低峰有对应关系。

岩体下滑时,由于存在一定的压力作用,沿滑动面可形成许多障碍区,岩体整体同时下滑将会受到阻碍,尤其是当下滑岩体的范围较大时。这样,在水平方向上,处于岩体端部的部分较易于破坏障碍区,首先发生下滑。然后,逐渐向另一端发展,造成掀斜滑动现象。由于在对障碍区的破坏过程中有应力的积累和释放过程,所以可能发生地震。随着岩体下滑活动的横向发展便可出现震中的迁移现象。据文献〔2〕介绍,山西盆地内的强震在时间上和空间上表现出自北向南迁移的特点,与第四纪以来盆地自北向南的掀斜活动方向一致。

2. 松弛作用与地震活动的关系

在岩体靠自重下滑的情况下,由于对两侧断层破碎带有压剪作用,因此可在岩体两侧产生出一定的让位条件,以利于下滑。但是松弛作用不能产生让位条件,因此在发生应力松弛后,在重力作用下岩体能否发生滑动还要决定于边界断层的产状。图1所示的断层的分布与组合类型是普遍存在的,由图可看出,在两侧挤压力松弛后,不需要让位条件岩体A和B便可以下滑。同样,组合岩体AB、BC及ABC也可以分别下滑。而岩体C则只能在前面

所述的自重作用的情况下下滑。

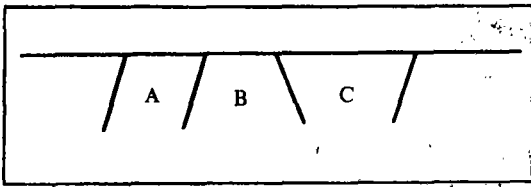


图 1 断层分布类型的剖面图

Fig. 1 The section sketch of types of faults distribution types

岩体在滑动过程中，由于断层之间仍有一定的挤压力作用，很容易产生粘滑，尤其是在断层面之间的断层破碎物质较少的情况下。岩体下滑后，断层可表现出正断层形态，但是却具有挤压特征。

据文献 1) 介绍，海原及其附近地区即图 2 中虚线所围地区的区域水平主压应力为北东方向，并存在北西和近南北向的压应力。但是，在该地区内却以垂直运动为主，这可能是由于各方向上的水平压应力的相互抵触作用，并受到当地构造条件的影响，使该地区所受的水平挤压作用减弱。由于区内及周围地区不断发生地震，应力逐渐松弛，岩体自身重力的作用占了主要地位，致使区内最大主压应力轴方向变为垂直向，因此在区内产生了以正断层性质活动的地震现象，与其外围地区的逆断层性质活动有明显的区别。

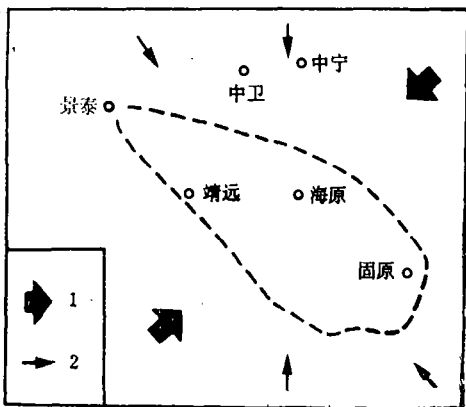


图 2 海原及其附近地区（虚线所围地区）所受压应力的分布简图（据文献 1）绘制）

1. 区域应力场作用方向 2. 其他压应力作用方向

Fig. 2 The map of the level pressure stress in Haiyuan area and its neighbouring region

应力松弛现象可以引起地震，而地震也可以产生松弛现象，如我国海城、唐山等地震震后震中区大幅度下沉现象等等。一般在地壳上部水平应力比垂直应力要大，因而对岩体起一定的支撑作用，当水平应力松弛后，岩体在重力的作用下自然要下沉。

应力松弛是由蠕变引起的，而蠕变量与应力差 ($\sigma_1 - \sigma_3$) 的值成正比关系，因此松弛作用可使水平方向上的构造应力差逐渐减小。而另一方面，由于岩石的流变性随深度增加而增大，因此越向深处，岩石中应力松弛的速度越快。这样便可以引起垂直方向上应力分布的不均匀，使不同深度的岩层之间的应力分布产生差异，引起构造活动上的不同步，造成局部的应力积累。

由于地下水位的升降反映孔隙水压的变化，而后者变化与岩体的非流变性松弛有直接关系，因此可通过地下水位的变化来了解岩体中的应力松弛状态，以作为前兆指标来预报地震。

1) 秦保燕等，大陆板内地震的垂直力源——对西海固地区的讨论，1982。

四、实例分析

1. 昌马断裂带上的断层反向活动

昌马断裂带位于北祁连山西段，作者对该断裂带上从月牙大坂到白杨河以东的一段进行了考察，发现近期该段的垂向运动还是比较明显的，主要表现为沿原逆断层的反向活动。该段断层的走向为北东东，断层面倾向南，倾角70°左右。

在距大泉口以东约3000米的地方对该断裂进行了探槽揭露。探槽走向近南北向，横切断裂带。探槽底部为灰绿色碎裂岩，顺层面的片理构造发育，次生变化很强。其上为坡积物，多为破碎带内的破碎物质和次生黄土，层理分明（图3）。在探槽东壁可见一条断层，走向为北东80°，倾角为65°，倾向南，为正断层形态，在断层上未见有明显的水平运动迹象。从图3可见，断层两侧的坡积层厚度不同，各对应层均为北厚南薄，但黄土堆积却是北薄南厚。并且，对应的坡积层之间的断距要比基岩的大，前者（如黑色砂砾层）的垂直断距约20cm，而后者只有10cm。这说明，断层在这些坡积层沉积时，一直为逆断层活动，致使断层上盘的坡积层薄，下盘的坡积层厚。在黑色砂砾层形成以后，断层开始反向活动，又造成上盘的黄土堆积比下盘厚的现象，并出现基岩的断距和坡积层的断距不等的情况，其变化过程见图4。断层两侧的拖曳痕迹也反映出断层的先“逆”后“正”的活动历史。下盘坡积层向上翘起，保留了逆断层活动时的痕迹，而上盘坡积层表现出“S”形，这正是断层反向活动的结果，图5为其示意图。

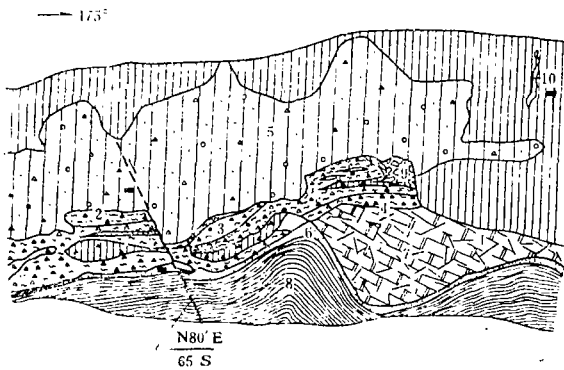


图3 大泉口以东探槽东壁素描图

- 1. 黄土 2. 坡积黄土 3. 黑色砂砾（发育水平片理）
- 4. 灰岩碎块（表面有粘土化现象） 5. 含角砾砂土夹层
- 6. 粗砂层 7. 碎裂灰岩 8. 碎裂岩 9. 灰岩大角砾
- 10. 裂缝和取样点（C4）

Fig. 3 The section sketch of the fracture in the east of Daquankou

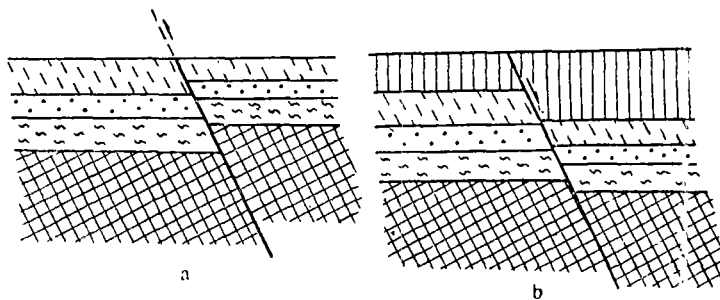


图4 断层活动过程示意图

Fig. 4 The sketch of the fault activity process

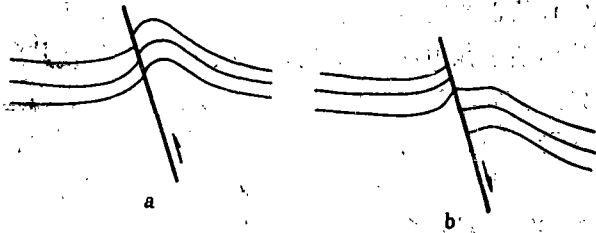


图5 断层拖曳形迹形成过程示意图

Fig. 5 The sketch of the towing trace formation process in fault

根据该地区的区域主压应力为北东—南西向以及该断裂带的产状，上述的逆断层反向活动用引张作用是难以解释的。因此笔者认为，当区域上的挤压应力作用逐渐稳定下来后，该区进入了应力调整阶段。在这个阶段中，岩体中的挤压应力逐渐发生松弛，使局部的应力场发生改变，造成逆断层的反向活动。该地区的热流值较高，并且山的主体都位于上盘上，这都有利于应力松弛及断层的反向活动。

由于松弛后的断层活动易出现粘滑现象，因此可以引起地震。地震使应变能释放，又使岩体产生松弛，引起一系列余震以及断层的再活动。

2. 山西霍山断裂带中断层的反向活动

山西霍山断裂带呈近南北向延展，组成临汾盆地的东界。该断裂带有过多期活动，至今仍有活动的迹象。在燕山期，该断裂带的活动主要表现为逆冲，在新生代则反向活动，显示出正断层形态。

在兴唐寺，断层为正断层形态，走向为北东5°，倾向西，倾角60°（图6a）。

在侯家庄发育两条近南北向的断层，两者相距约50米，西边的断层为逆断层，东边的断层为正断层形态，两者的断面均倾向西，前者倾角为75°—80°，后者倾角为72°（图6b）。这两条断层的断面沿走向有向东、向西的摆动现象。上述两处的破碎带均宽20余米，带内岩石破碎十分强烈，动力变质岩发育。带中及围岩内发育的挤压透境体长轴方向和紧密的小褶皱的轴面产状均与断层面相近，反应出是受东西向强烈挤压作用的结果。从临汾盆地所处的大地构造位置可以看出，其区域应力场的主压应力方向为近东西向。

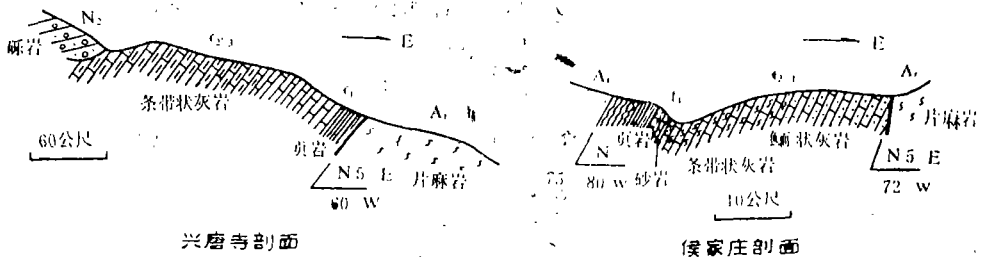


图6 兴唐寺和侯家庄处断层剖面图

a. 兴唐寺剖面 b. 侯家庄剖面

Fig. 6 The section sketch of the faults in Xingtangsi and Houjiazhuang

江南生和辛书庆〔8〕（1979）通过对这两处的考查和取样进行应力矿物分析后认为，在这两处未见有明显的受引张作用的标志。

据文献〔7〕的研究可知，从更新世以来，盆地长期下降后，有振荡回反上升现象。现今临汾盆地是由一些次级隆起与凹陷组成的。在中更新世后盆地曾受过强烈的挤压作用。

上述事实说明,在兴唐寺和侯家庄两地发育的正断层不是引张作用的产物。笔者认为,这是由于该地区在燕山期受强烈挤压作用后的调整过程中,由于受到印度板块的作用,使其所受到的东西向挤压力减弱,局部地区应力场发生改变,开始了以垂向运动为主的时期。在这个时期中,由于隆起区的抵挡作用,使凹陷区受到的水平挤压力相对更弱,有利于应力的松弛过程。在应力松弛到一定程度后,局部应力场发生了较大的变化,岩体在自重的作用下沿断层带下滑,出现了具有挤压特征的正断层形态。这种断层是一种挤压松弛断层。当水平挤压作用增强时,反向活动即停止,甚至可与隆起区一起上升,出现回升现象。

当应力松弛后,在重力作用下逐渐下滑的断层下降盘不断接受沉积,形成很厚的沉积层,反过来更有利于下降,因此在盆地中普遍发育有同生断裂。

山西盆地中的地震活动与垂直差异性运动关系密切,因此应注意由应力松弛引起的重力滑动现象诱发地震的可能性。山西新生代形成的盆地的边缘断裂带上的重力滑动现象是比较普遍的。由实验可知^[8],发生粘滑要有一定的围压条件,围压较低或过高都不利于产生粘滑,而在松弛过程中压力的变化范围较宽,因此可能产生发生粘滑所需的围压条件,因此在滑动过程中易于产生粘滑。由于地震也是导致应力松弛的一种途径,因此在一次大地震发生后,局部应力急剧松弛,又可引起一些快速重力滑动,发生一系列地震,出现一个地震活动阶段。

断层活动过程中的水平运动分量是由水平剪切作用引起的,但是当垂直于断层带方向上挤压力很大时,沿断层的水平错动也是不易发生的。因此,有些情况下断层的水平错动也是当垂直于断层带上的水平挤压应力松弛到一定程度后才发生的。

逆断层的反向活动现象在渭河盆地地区也可见到,盆地内也普遍发育同生断层,这说明汾渭一带的盆地在构造活动上具有一定的相似性。

3. 新西兰Inangahua地区地震活动中的应力松弛现象

新西兰的Inangahua地区在1968年5月23日发生了7.1级地震^[12]。根据震源机制解(图7a)及地面断层发育情况,确定出主震断层走向为北东 19° ,倾向东,倾角 44° 。发震时的断层活动为逆断层性质,略具左旋分量,这与区域上的压应力场作用是一致的。主震后的余震活动很频繁,四十天内共测得809个余震,其中 $M \geq 5$ 级的地震有12个。在主震后约三年零八个月的1971年1月4日至19日几天中,又观测到一系列 $M \geq 3.1$ 级地震。震中基本上分布在早期余震震中分布的区域内,只是范围略小一些。根据它们的初动合成,有一走向北东 27° ,倾向北西,倾角为 78° 的节面与地面断裂的产状相近(图7b)。但是发震断层的活动性质与主震相反,为正断层性质,也略具左旋分量。这与区域压应力场的作用是相矛盾的。

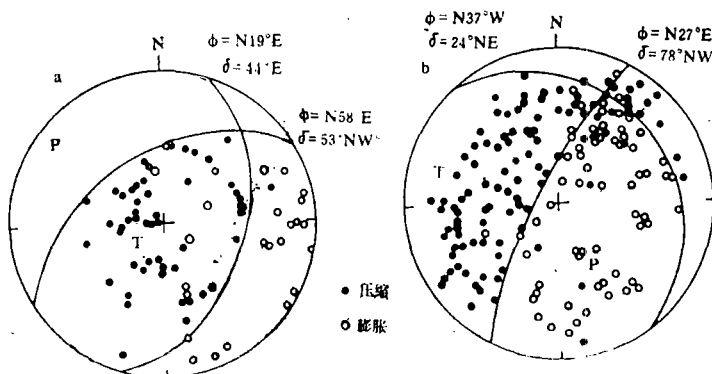


图7 Inangahua地区地震系列的震源机制
a. 主震(大圆)和早期余震 b. 晚期余震

Fig. 7 The focal mechanics of the seismic series in Inangahua

笔者认为，对该地区震源机制的变化可以用由地震引起的应力松弛现象来解释。根据主震、早期余震的发震断层产状和晚期余震的发震断层产状来看，主震和早期余震的发震断层的倾角较缓，晚期余震的发震断层的倾角则较陡。在区域水平应力场的挤压作用下，倾角较缓的断层比倾角较陡的断层易于发生逆冲活动。在逆冲活动中，由于不断地释放所积累的弹性应变能，产生出一系列的地震。在主震释放了主要能量后，随着余震的频繁发生，该地区的构造应力迅速降低，产生了较高级别的松弛状态。夹在断层中的岩体所受到的水平挤压力减弱，因此在自重的作用下沿断层向下滑动。

由于在倾角较陡的断层面上由岩体重量引起的平行于断层面的剪切分力要比倾角较缓者大，因此在剪切作用下，倾角较陡的断层面上的障碍体和凹凸面更易于被破坏，使岩体在重力的作用下突然错动，出现了正断层性质的活动，并引起地震。而在断层活动中出现的左旋分量，可以是区域内其他方向上的水平应力叠加的结果。

五、结 语

综上所述，可以得出以下几点认识：

(1) 在断层带处于暂时平衡状态时，由于外界条件变化的影响，可引起岩体滑动状态发生突然变化，产生地震。

(2) 岩体的应力松弛现象可引起一些构造活动。产生应力松弛的原因有流变学方面的，也有非流变学方面的。由于松弛后岩体沿断层面的滑动过程中，仍受到一定的挤压作用，因此易于出现粘滑现象。

(3) 通过模拟实验发现，掀斜现象可以由在自重作用下的不均匀沉降造成，并且由于应力松弛作用而造成的构造活动的复杂性，因此笔者认为，只根据地质现象的两态（起始态和终止态）标志来判断断层的力学性质以及其形成的过程是不够的。

在本文的写作过程中，侯珍清老师给予了指导和关怀，郭增建老师在思路给予了有益的指点，在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 陶振宇，岩石力学的理论与实践，水利出版社，1981。
- [2] 李绍柄等，山西地震带内强震迁移活动与地壳系的掀斜运动，山西地震，No. 4，1984。
- [3] 江南生、辛书庆，山西霍山断裂带的应力矿物分析及力学性质讨论，地质力学论丛，No. 5，1979。
- [4] 李玉龙，陕甘宁青四省（区）新构造与现代构造应力场及其动力来源的初步分析，西北地震学报，Vol. 1，No. 4 1979。
- [5] 杨承先，华北新生代裂谷系的断块结构及重力滑动构造，地震，No. 6，1981。
- [6] 刘光勋，汾渭地堑边缘挤压构造带及其地质意义，构造地质论丛，No. 4，1985。
- [7] 陈国顺等，山西中部断陷盆地发生强震的构造背景，西北地震学报，增刊，1985。
- [8] 北京大学等，地震地质学，地震出版社，1982。
- [9] J. B. Rundle and D. D. Jackson, A viscoelastic relaxation model for post-seismic deformation from the San Francisco Earthquake of 1906, Pageoph., Vol. 115, 1977.
- [10] Taokao Eguichi, Tectonic stress field in East Eurasia, Physics of the Earth and Planetary Interiors, Vol. 33, 318—327, 1983.
- [11] Ye. S. Shtengelov, The connection between seismic activity and surface water and ground-water regimes, Physics of the Solid Earth, Vol. 19, No. 3, 1983.
- [12] F. F. Evison, et al., Late aftershock, tectonic stress and dilatancy, Nature, Vol. 246, No. 5434/35, P. 471—472, 1973.

**FUNCTION OF RELAXATION AND CREEP SLIPPAGE IN THE
COURSE OF GRAVITATIONAL SLIDING AS WELL AS
THE RELATIONS BETWEEN THEM AND EARTHQUAKES**

Yan Haige

(Seismological Bureau of Shanxi Province)

Abstract

During working in field, the author has often seen some faults with steep dip angle which appear the form of normal fault but have the squeezed feature. The stress action way mirrored by the faults is contrary to regional stress field. Based on the functions of mechanical properties of rock bodies and their changes in tectonic activities, these contradiction phenomena are discussed. The mechanical properties of rock mainly include the gravity of rock body and the stress relaxation, and the author considers the relaxation in rock is caused by both aspects of rheology and non-rheology. Based on the idea, the relations between these factors and seismic activities are discussed, and some practical tectonic phenomena also are analysed.