

现场大尺度摩擦实验中观测到的断层泥中的塑性变形波

耿乃光

(国家地震局地球物理研究所)

许东俊

(中国科学院武汉岩体土力学研究所)

摘 要

本文介绍了在断层区的岩体中进行的现场大尺度摩擦实验。实验的目的是探索地壳中变形波的存在。实验结果表明,在加载时断层泥屈服时间不一致,加载一端的断层泥先屈服,然后屈服范围逐步扩大,此过程相应于塑性变形波在断层泥中的传播。实验测得试件中塑性变形波波速约为2—3 cm/min,实际相当于10—16 km/year。

一、引言

近年来,一些地震学家提出,在地震的孕育过程中,地壳介质中可能存在着某种缓慢传播的变形波。Вилькович等认为,沿地震带或构造带强震的活动表现出波动现象,提出震中迁移波的概念〔1〕。他们统计出几个地震带震中迁移波的速度,其量级为每年数10 km。Ruina在分析摩擦滑动的失稳时提出可能有一种蠕变波〔2〕。冯德益总结分析了有关地震活动波的研究〔8〕,认为从统计学的观点看,地震活动波是存在的。关于这种波的产生机理,冯德益认为是外因触发与震源区介质性质变化两者结合的结果。某一触发因素引起的扰动,产生特长周期的形变波或蠕变波,并沿相对薄弱的地震构造带内的流变介质向外传播。由于至今人们未能观测到这种缓慢传播的变形波,因此对其机理的研究无法深入下去。并且由于这种波的特性(周期长、速度低),使得无论在自然界或在实验室中观测它都是困难的。为此,我们进行了一批现场大尺度的实验,使试体中包含一定尺度的流变介质层,以探索某种触发扰动能否在流变介质中引起蠕变波。

二、实验方法

实验在断层区的岩体中进行。首先在岩体中开挖一条数十米长的坑道,然后在坑道内预留出的岩体上切割试体。试体的尺寸为50×60×30 cm,其形状如图1所示。制作试体时将

断层面和软弱夹层作为摩擦面，这样，在实验时相互错动的断层角砾岩之间有一层5cm左右厚的泥质夹层，形成岩石间的流变介质层。其60cm的长度用来观测塑性变形波的传播。

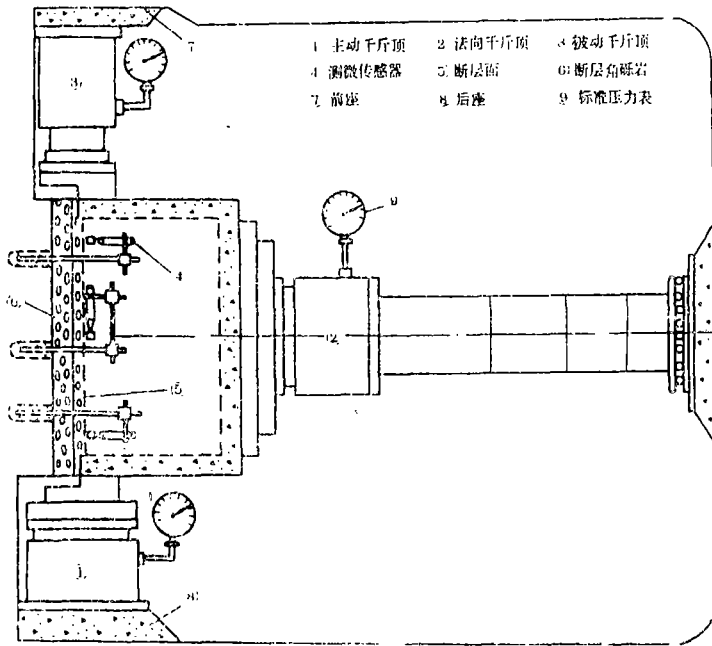


图1 试体的形状和实验装置

Fig. 1 Test sample and test set

实验装置见图1，加载方式为直剪式。通常的直剪实验用两台油压千斤顶加载，一台用于施加剪切荷载（图1中千斤顶1），一台用于施加正向荷载（图1中千斤顶2）。这样的加载系统会造成试体的突然失稳，难以对临近失稳时的细节及失稳的全过程进行观测。为了能够观测到失稳前后泥质夹层中的变化，必需建立刚性实验条件。为此，我们增加一台油压千斤顶（图中千斤顶3），由两台千斤顶即一台主动千斤顶及一台被动千斤顶控制剪切荷载。载荷力由安装在千斤顶上的压力表测量，其误差为1%。

应用CBS—3型数字显示式电感位移计测量位移，其误差为0.5%。位移计的安装位置如图1所示。用一个探头测量剪切向位移，用两个探头测量法向位移。本实验剪切方向的加载位移率为 $2 \times 10^{-3} \text{ mm/s}$ 。

三、实验结果

图2和图3给出了实验测得的剪应力—位移曲线。图中纵座标 τ 表示剪应力，横座标 u ，表示切向位移，曲线旁的 σ 值表示法向应力。

由图可见，在加载的初始阶段，随着应力的增加，位移变化量很小，曲线表现很陡。当应力增加到一定值时，曲线弯曲，这相应于岩石间软弱夹层介质的屈服。夹层介质屈服后，剪切方向的载荷力难以有大幅度的增长，试体在剪应力变化不大的情况下开始持续地滑动。

仅用剪应力—剪切向位移曲线难以确定软弱夹层的屈服强度。日本土木学会岩盘力学委员会提出用测定试体中部的法向位移确定强度极限^[4]，其方法如图4所示。图中右部为剪应力—切向位移曲线，左部为剪应力—法向位移曲线。由图可见，在剪应力增加过程中，法

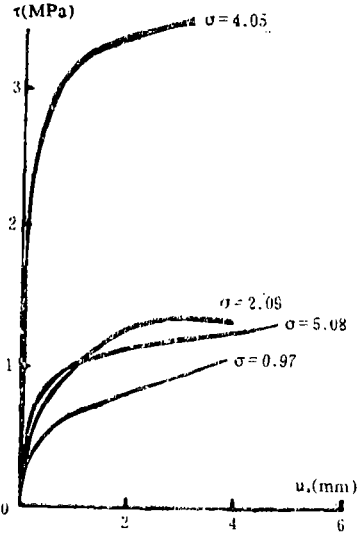


图2 含钙质断层泥夹层试体滑动时的剪应力—位移曲线

Fig. 2 Relationship between shear stress and displacement for slipping of the test sample intercalated Ca-bearing fault gouge

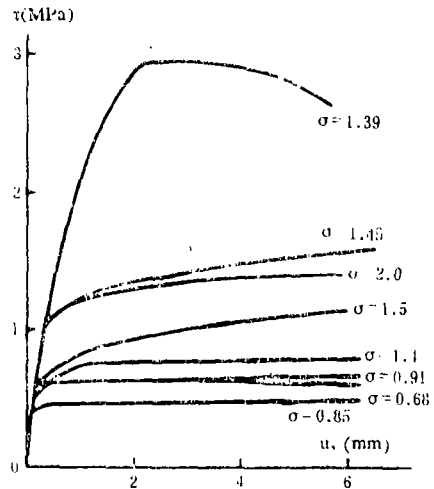


图3 含泥质夹层试体滑动时的剪应力—位移曲线

Fig. 3 Relationship between shear stress and displacement for slipping of the test sample intercalated mud-bearing fault gouge

向位移曲线表现出先下降而后上抬。这一变化反映了夹层中的介质经历了由剪压到剪张的转变过程。法向位移上抬点相应的剪应力被认为是夹层介质的屈服强度极限。

我们发现，在大尺度的实验中，试体各部位法向位移上抬时间不相同，也就是夹层中的介质达到屈服极限的时间不相同。多次实验一致表明，接近主动千斤顶一侧的夹层介质首先屈服，然后，夹层介质的屈服范围逐渐扩展到被动千斤顶一侧。这一过程相应于塑性变形波在软弱夹层介质中传播。波所到之处介质达到屈服（图5）。我们在主动千斤顶一侧和被动千斤顶一侧各安装一只法向位移计，测出此二点法向位移上抬的时间，根据试体的尺寸可以

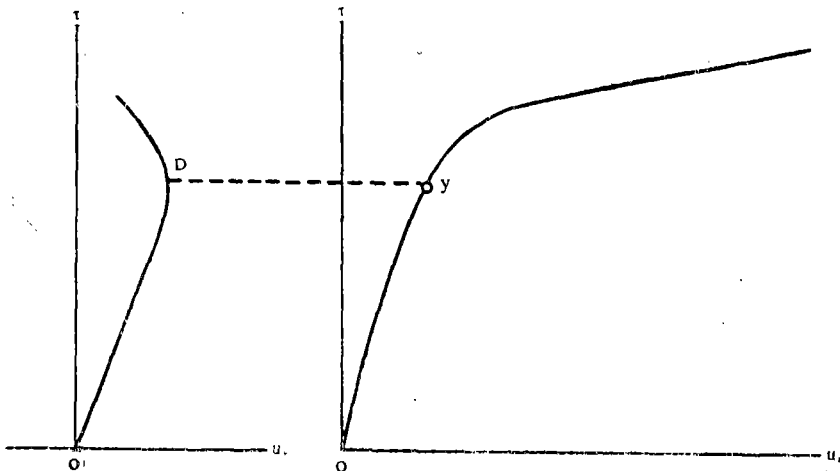


图4 确定屈服强度极限的方法

Fig. 4 The method determining the limit of yield strength

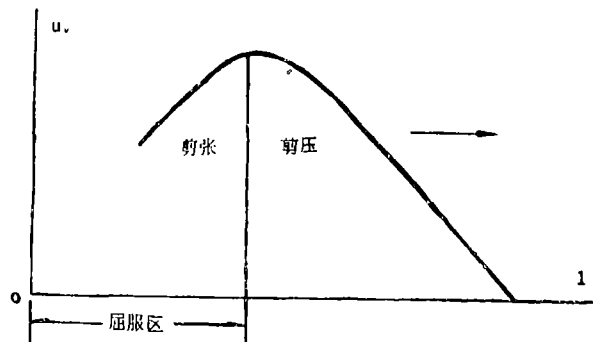


图5 塑性变形波在软弱介质夹层中的传播

Fig. 5 Plastic deformation wave propagating in the intercalation of soft-weak medium

得到夹层介质中塑性变形波的传播速度。对12个试体的测量结果为2—3 cm/min, 相当于10—16 km/year。

四、讨论

上述实验表明, 在硬介质中存在软弱介质带状夹层的条件下, 发生于一端的应力扰动在一定条件下可以在软弱介质中激起一种塑性变形波。此塑性变形波以缓慢的速度由夹层的受扰动一端传播到另一端。

在地球内部, 存在着一些易于流变的介质组成的夹层, 在一定条件下, 也有可能激发起某种塑性变形波在其中传播。如果这种波存在, 它对地震的孕育过程将起着不可忽视的作用。

研究塑性变形波对地震预报研究有一定的意义。它的存在揭示了一个地震触发另一个地震的机理。当一个大震发生后, 掌握塑性变形波的传播速度有助于对即定的地震危险区进入危险期的时间作出估算。其本身可成为多种前兆(地质、物理、化学、生物)的成因。

由于实验是在天然断层上进行的, 因此直接反映了夹断层泥的断层的失稳过程。当断层受到剪切力作用时, 起初断层泥仅在局部地方屈服, 此时断层尚未失稳。随着断层泥屈服范围的扩大, 断层越来越临近失稳。由此可以看出, 断层泥的屈服及断层泥中塑性变形波的传播, 对断层的失稳具有重要的意义。

本实验虽然在天然断层上进行, 但仍仅反映了一种介质差异十分明显的情况。自然界的情况是复杂的, 设法观测自然界大范围内传播的塑性变形波是对地震研究具有十分重要的意义的一个问题。

冯德益教授阅读了原稿并提出了宝贵意见, 在此表示谢意。

(本文1988年7月10日收到)

参 考 文 献

- (1) Вилькович, Е.В., Губерман, Ш.А., Кейлис-Борок, В.И., Волны тектонических деформаций на крупных разломах, ДАН СССР, Vol.219, No.1, 1974.
- (2) Ruina, A., Slip instability and state variable friction laws, J.Geophys.Res., Vol.88, No. B12, 10359—10370, 1983.
- (3) 冯德益, 地震活动波的研究, 世界地震译丛, No.2, 1986.
- (4) 日本土木学会岩盘力学委员会, 土木技术者のための岩盤力学, 日本土木学会, 1971.

THE PLASTIC DEFORMATION WAVE OBSERVED IN FAULT GOUGE
IN FIELD TESTS OF LARGE SCALE SAMPLE'S

Geng Naiguang

(*Institute of Geophysics, SSB, Beijing, China*)

Xu Dongjun

(*Institute of Rock and Soil Mechanics, Academia
Sinica, Wuhan, China*)

Abstract

Recently some scholars think that in the crust the stress probably causes slow plastic deformation wave, and consider that this deformation wave is significant in process of earthquake pregnancy. However, it is difficult to observe this deformation wave both in nature and in laboratory. We proceeded some field tests of large scale samples to explore the existence of this wave. The tests were proceeded in rock body of fault zone. The test bodies of which size is $50 \times 60 \times 30 \text{cm}^3$, were made in tunnels. The frictional surface is layer of nature fault gouge. The tests show that during loading the yield time of gouge is not identical. The gouge near the loading end yields first, then the yield scope expands progressively. This process corresponds with the propagation of plastic deformation wave in fault gouge. The measured velocity of plastic deformation wave is about 2—3cm/min, it corresponds to 10—16km/year.