

慢滑移：一种新型地震

北美洲西海岸的卡斯卡迪亚古陆俯冲带曾多次发生震级大于 8 级的逆冲大地震。通过全球定位系统 (GPS) 对瞬间变化的地表形变进行连续观测, 美国科学家发现, 卡斯卡迪亚古陆北部俯冲带比较深 (35—55km) 的表面发生了滑移现象。2012 年 1 月份的 *Physics Today* 杂志上 (2012 年第 1 期, 第 38—42 页) 刊登了西雅图华盛顿大学 John E. Vidale 和 Heidi Houston 地球与空间科学教授撰写的《慢滑移：一种新型地震》一文, 文中对这种处于突发性浅层地震区和深层连续粘滞运动区之间的中间地层区域的慢滑移现象作了介绍与探讨, 揭示慢滑移这种近年新发现、仍不广为人知的地震特性。现摘译如下:

人们对于地震的认知已有一百多年。地震是由于地壳内部应力的积累, 使地壳岩层变形, 直至断裂、错动, 急剧破裂, 产生震波, 引起一定范围内地面振动的现象。尽管对于板块摩擦和断裂力网络结构演化行为的一些细节仍需澄清, 但就像十年前我们认识到的那样, 一般地震的过程无外乎两个部分, 即快速滑移与缓慢重填的过程。

地震作为一种自然现象, 标记了构造板块间的相对运动。1960 年以来, 板块学说简单地将地球分为岩石层和软流层两个部分; 岩石层由许多大大小小的岩块组成, 板块边界地震频发, 其下的软流层则是一个安静而只有稳定的粘滞形变的区域。间断性震颤与滑移 (ETS) 现象的发现为此认知加入了新的维度。这种属于板块断裂滑移的现象, 比普通地震要缓慢数个量级, 同时所发生的位置比普通地震要深。这种现象的发现帮助我们更好地研究板块边界区域, 甚至提高我们对大地震的预测能力。

本文中 will 用“慢滑移”一词来替代 ETS。这是因为仔细观察发现震颤的频率范围其实很广, 周期可以从几十毫秒到一年, 甚至一些短周期小的震颤会叠加在大的主震颤上, 很难明确它的间断性。它们却有一个共同特点, 即其移动速率比普通地震低很多, 因此使用“慢滑移”一词能更准确地表述此现象。另外, 为了区分火山爆发时岩浆产生的颤动信号, 通常命名慢滑移中的颤动为“非火山型颤动”。同时, 普通地震产生的颤动信号是在板块交界处附近直接由剪切滑移产生的, 但是慢滑移带中存在高压流体 (含水和二氧化碳), 慢滑移震颤极可能就是由这些流体引起的。

板块构造

地球接近地表的 100km 厚度为地壳和地幔, 地壳分裂为许多板块。板块由岩石组成, 岩石本身较硬, 变形不大。相互摩擦的相邻板块的相对运动所引起的形变, 数千年平均下来大约有几 cm/yr 到 20cm/yr。

根据板块的相对运动, 板块之间的边界可以分为三种类型。俯冲带地质边界由错位的上冲和下冲两构造板块形成。另一种类型如海洋中脊, 相邻两板块向外移动, 中间由新的岩块上涌形成山脊。第三种为地壳改造断裂带边界, 相邻板块彼此侧向相对运动。俯冲带在自然和人文科学上都是最引起关注的, 许多大的地震都在此形成。

慢滑移可以在两个板块交汇的俯冲带处清晰的看到。本

文仅以卡斯卡迪亚古陆地区俯冲带的慢滑移为例, 俯冲带的地质构造如图 1 所示。慢滑移发生于普吉特海湾之下深约 35—55km 深的区域, 介于一般浅层地震区与深层连续流动区域之间。浅于 35km 的区域内, 板块边界运动一般服从经典的规律——在产生突然的快速滑移前可能静止几十到几百年。而深于 55km 的区域一般认为是定常的、平滑的运动。虽然在地壳改造断裂带这类浅层区域, 如加州圣安德烈斯断裂带, 也可以观测到震颤伴发的慢滑移。但大多数慢滑移都还是发生在俯冲带附近的。

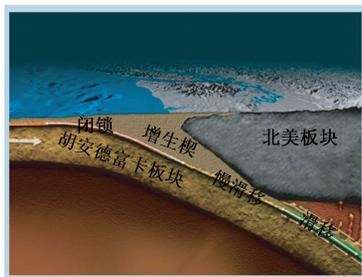


图 1 慢滑移主要出现在俯冲带, 位于浅层闭锁区和深层自由滑移区之间的板块边缘处。图中显示西雅图和温哥华地层下卡斯卡迪亚古陆俯冲带的东西向截面。胡安德富卡板块卡在北美板块下方, 两者一块运动。俯冲板块被刮下来的海洋沉积物堆积形成增生楔

震颤与慢滑移

卡斯卡迪亚古陆地区的慢滑移事件是全世界范围内最活跃的, 最能定期复发的, 也是被研究得最清楚的。它沿着板块边界移动的平均速率为 4cm/yr。但是根据 GPS 测量表面变形的结果显示, 在深度 35—55km 处, 板块边界层一般在静止 11—15 个月突然快速移动几周, 而不是按照上述平均速率均匀移动。这种循环的周期性很强, 文献数据显示其涨落幅度仅在 10% 之内。

2000 年代初期, 在卡斯卡迪亚古陆地区慢滑移被发现的同时, 同样的现象也在日本被发现。在闭锁边界下的板块边界层的俯冲带, 探测到了间歇性长期的阵阵震颤。这类高频震颤振幅起伏, 可以持续数分钟到几天, 不像常见的地震那样是突发的。这种震颤用高质量的地震仪网络可以很清晰地被观测到, 它的频率一般在 2—10Hz 的范围内。日本最近启用了一套由数百个安装在 100—2000m 深的钻孔中的地震仪组成的 Hi-net 网络。密集的观测站和安静的周围环境使得科学家们能够排除其他的一些干扰信息, 很好地接收到震颤信号。从这些观测站得到的共同的幅度调制信号,

本栏目是经美国物理联合会 (AIP) 授权, 与 *Physics Today* 合作的项目

可以确认震颤产生于地表深处。另外,与北美科学家发现的一样,日本科学家使用 GPS 观测技术也发现了在产生震颤的同一区域、同一时间也测到缓慢的变形。这说明震颤和慢滑移经常在同一断裂带同时发生。

慢滑移特性

先前的理论认为,断裂带深层以稳定的速率移动。而慢滑移事件的发现彻底颠覆了这种认识。这种新的现象持续时间长,周期性复发,与传统意义上的地震截然不同。

另外,慢滑移释放的应力强度比一般地震要弱很多,它移动的幅度很小,但传递的范围却很广。同时,慢滑移对于微小的应力变化很敏感。它可以被潮汐应力和远处地震的表面波所激发。慢滑移伴随的震颤的传播速度和方向也具有自身特点。以主要的慢滑移为例,其在板块边界处的传播速率为 10km/d。以小时为时间尺度来看,这个过程显得断断续续、毫无规律;而以天为时间尺度来观测,不难发现这种运动相当稳定。但这个前进的过程会被间歇性的后退所中断,有时这种反向移动的速率高达 200km/d。如果以分钟为时间尺度,可以观测到一般以将近 50km/h 的速率沿着板块相对移动的方向传播,这大大区别于普通的地震。后者的应力在岩石中的传播速率一般为 2—3km/s。除此之外,慢滑移的持续时间与地震矩(正比于断层面积与滑移长度的乘积)的关系也与传统意义上的地震不同。前者以稳定的速率滑移并辐射能量,即持续时间与地震矩成正比;而对于后者来说,持续时间与地震矩的立方根成正比。基于这些明显的差异,我们可以认为,慢滑移与普通地震是两种在概念上有所区别的自然现象。

物理原理

简单来说,慢滑移的物理机制可以解释为交界处上冲板块与下冲板块相互摩擦的结果。它们各自脆性表面间的摩擦力控制着这种相对运动。但实际上我们对俯冲带交界处的物理化学环境知之甚少,很多因素都会对慢滑过程产生较大的影响,比如交界面可能会在地下较深处的高温高压情况下扩大,矿物质会在不同的深度发生不同的相变过程,和一些流体(水和二氧化碳)对慢滑移的复杂作用等等。

另外,以普通地震观测结果为基础建立的经验性的摩擦定律在用到慢滑移过程时必须做适当的修正,比如我们应该引入新的物理机制以防止模型中慢滑移速率加速到普通地震;释放的应力应比普通地震低几个数量级等。考虑这些因素后,现有的理论已经能够描述一些慢滑移现象(卡斯卡迪古陆地区),并在小时间尺度上模拟震颤的快速传播。但是仍没有一个系统而清晰的认识可以把经验性的定律与实际的物理化学性质建立起联系。比如,因为岩体的各向异性且难以直接探测,震源区域的相变现象就很难研究。

长达数月的矿物质沉降带来的“修复”可以降低慢滑移的发生周期。或者,加速的滑移可能会带来两种相反的后果:被加热的岩石间的摩擦力会变小;剪切岩体中充满了液体的空隙的膨胀导致摩擦力增大。在这个模型中,由液体控制的摩擦力变化决定了滑移的快慢。一些经常发生慢滑移的区域内,都在俯冲带中观测到了异常的高泊松比和高电导率。这间接说

明其中储藏了充足的液体物质。而且理论预测,发生脱水反应的区域深度与发生慢滑移区域的深度相吻合。

有待研究的问题

并不是在每一个板块边界都能观测到慢滑移。具体的原因也尚待研究。通过观测来找出模式规律可能会帮助我们更多地了解慢滑移存在的地质特征。但仍不能确定到底交界处附近的物理特性是否真有更重要的影响。

上面提到的诸多现象表明,液体对于慢滑移的发生至关重要。其带来的后果——岩石弱化,不仅会引发一般的地震,还可能是产生慢滑移的关键因素。最近发现的一个现象:震颤条纹会沿着断层相对移动的方向排列,正好验证了我们上述猜测。

对于慢滑移的研究是否有助于我们更好地了解大地震呢?也许是这样的,而这也是推动这个领域研究的主要推力。但是至今还没有人能够系统地监测过大地震前后慢滑移区域是否发生过异动。所以这个问题尚待进一步的研究。

如果慢滑移区域将大部分应力都释放掉了,那么其具体的位置就应该是那些应力大到岩石内部承受不了而发生断裂的地方。但是我们还不清楚发生震动的位置是否能够很好地勾勒出那些危险的闭锁区域的边界。

如果大地震的发生与附近的慢滑移带处于活跃期有关联的话,那么事情就变得简单许多。据统计,大部分慢滑移带只有低于 10%的时间处于活跃期。这样的关联就可以缩小推断大地震可能发生的时间窗口。但是在卡斯卡迪古陆地区,那些可能发生大地震的区域全都靠近非常活跃的慢滑移带。所以二者的关系显得并不那么直接,也许需要更长时间尺度的观测和数据分析与总结。

除此之外,慢滑移发生的模式可能是在大地震区域应力蓄积的过程中演生的(目前只是一个猜测)。一些数值模型显示,大地震可能成核于慢滑移带;或者,导致大地震的慢滑移事件可能覆盖或大或小的一个区域,且复发更频繁,并有明显的加速趋势和更大的活跃度。

一个大胆但不现实的想法是,我们也许能够直接从地质物理性质的变化来揭示慢滑移带来的应力重构,由此来预判下一次九级大地震的临近。

最近的观测结果非常令人振奋。对 1999 年土耳其伊兹米特大地震的密切观察显示,断层破裂的下方在震前发生了与慢滑移触发现象相符的长达一个小时的加速地震活动。同样,2011 年日本东北大地震前的一个月,特别是两天前,主震区附近也观测到了慢滑移及其他地震活动。虽然慢滑移的发生与大地震两者之间联系的必然性还有待深入研究,但这两个例证对于迄今令人沮丧的地震预报来说可能是一大进展。

如今,慢滑移的发现激发了地球物理学家广泛的关注。观测是获得答案的最好方法,现在密集的地震仪阵列已被安装在许多地震活跃的区域,我们希望它们能为我们最终揭开问题的真相。

(中国科学院物理研究所 张因、厚美瑛 编译自 John E. Vidale, Heidi Houston, *Physics Today*, 2012, (1):38, 原文详见 <http://ptonline.aip.org>)