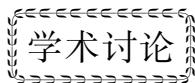


文章编号: 0253-3782(2000)05-0553-06



一个可用于地震分析的界面力学模型^{*}

沈新普¹⁾ Zenon Mroz²⁾

1) 中国沈阳 110006 东北大学理学院力学系

2) IFTR, Polish Academy of Sciences, 00-049, Warsaw, Poland

摘要 首先简要介绍了层间界面在侧压力及反平面剪切载荷共同作用下, 剪切破坏的剪切梁模型及其主要力学行为特性; 在此基础上, 分析了层间界面失稳阶段结构对外界的能量释放量, 以及由于层间界面上“应力锁死”现象而产生的后续再加载过程中的载荷突变; 最后讨论了上述力学现象的地震学意义.

关键词 层间界面失效 剪切梁模型 应力锁死 失稳 载荷突变 地震

中图分类号: P315.3⁺3

文献标识码: A

引言

我国是一个地震多发国家, 深入研究地震机理对我国的防震减灾有重大意义. 几十年来, 众多的科技工作者从理论分析和实验观测等方面进行了大量的研究工作(杜兴信, 邵辉成, 1999; 江在森等, 1998; 焦明若等, 1999; 曾海容, 宋惠珍, 1999; 宋治平等, 1999). 尽管如此, 由于地震力学机理的复杂性, 目前的地震机理及过程的力学分析, 在国际上仍然是一个有待解决的问题. 基于地质结构的力学量的观测研究与地震预报都仍处于初级阶段.

地震是由断层两侧岩层在载荷作用下发生失稳错动而产生的, 这一点已为广大地震科学工作者所公认. 宏观地讲, 地震并不对完整岩石层产生破坏作用, 因为地震总是在同一个地方反复发生; 又由于地震发生时岩层主要的运动形式是相对错动, 因此可以认为, 地震是岩层地质体的层间界面在侧压力(地应力)及剪切载荷共同作用下的剪切失效产生的结构失稳行为. 深入研究地质岩层的层间界面在侧压力及剪切载荷共同作用下的剪切破坏(失效)的力学机理和相关的力学量的演变规律, 对于地震研究有直接的重要意义.

有关层间裂纹的综述可见 Hutchinson 和 Suo(1991)文章, 但是, 侧压力及剪切载荷共同作用下层间界面剪切失效的力学研究并不多见. 最近, Mroz 和 Shen(1999)提出的“剪切梁”模型, 首次给出了侧压力与反平面剪切载荷共用作用下层间界面失效的初步分析结果. Shen 和 Mroz(2000)进一步给出了在卸载和再加载过程中, 剪切梁层间界面裂纹扩展规律的解析计算结果. 从上述文献给出的结果来看, 剪切梁模型的特点在于: ①能够再现岩石

* 东北大学青年科学基金资助课题(856049).

1999-11-03 收到初稿, 2000-02-24 收到修改稿并决定采用.

层间界面上的“应力锁死”现象；②能够解析求解失稳时平衡路径上结构的载荷-位移行为。这一模型为定性和定量了解整个加-卸载过程中层间界面各力学量的变化规律提供了有效的工具。

本文首先简要介绍 Mroz 和 Shen(1999)提出的剪切梁模型及其主要的力学行为特性；在此基础上，分析由于层间界面上“应力锁死”现象而产生的后续再加载过程中的载荷突变，以及失稳阶段结构对外界的能量释放量；最后，将上述力学现象与地震过程相联系，给出有关讨论。

1 反平面剪切问题及剪切梁模型

图 1 为一对受反平面剪切作用的梁，几何尺寸标于图中。梁间厚度为 $2h$ 的“粘性层(内聚力层)”，且 $h \ll t$ 。这里， t 为梁厚度。均布侧压力 $\sigma_{zz} = \sigma_n$ 作用于梁的上表面，在梁的 $x = 0$ 一端作用有载荷 $\tau(0, z)$ ， $\partial\tau(0, z)/\partial z = \text{const}$ 。另一端 $x = L$ 为自由端。界面层上的损伤区及裂纹将自 $x = 0$ 处开始萌生，并向 $x = L$ 端扩展。假设梁的宽度 b 远大于厚度 t ，忽略梁的弯曲效应，从而近似认为，梁为反平面剪切状态下的平面应变梁。这样，梁内只有非零剪应力 τ_{yx} 和 τ_{yz} 及侧压力 $\sigma_{zz} = \sigma_n = \text{const}$ 作用，其它应力分量为 0。按弹性理论，可得梁的平衡方程为

$$\frac{\partial\tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yz}}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

用 $w = w(x, z)$ 表示梁中沿 y 轴的位移，并且应用 Hooke 定律，有

$$\tau_{yz} = -G_2 \frac{\partial w}{\partial z} \quad \tau_{xy} = -G_1 \frac{\partial w}{\partial x} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)，则式(1)化为

$$G_1 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + G_2 \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} = 0 \quad (3)$$

式中， G_1, G_2 分别为沿 x 轴和 z 轴的剪切模量。梁的力边界条件为：底部(即层间界面上) $z = 0$ ， $\tau_{yz} = -\tau_f$ ；上表面 $z = t$ ， $\tau_{yz} = 0$ ；加载端 $x = 0$ ， $\tau_{xy}(0) = f_0(y, z)$ ；自由端 $x = L$ ， $\tau_{xy}(L) = 0$ 。

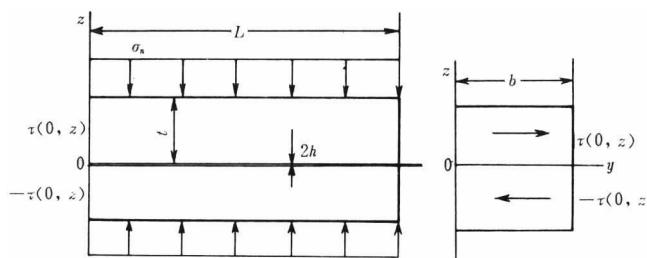


图 1 由粘性层结合的一对梁

求解图 1 所示的层间界面裂纹扩展问题，即为在给定边界条件下，结合特定的层间界面材料本构，求解式(1)及式(3)。直接求解式(1)及式(3)是困难的，尤其是对模型失稳阶段的计算十分困难。为了克服这一困难，Mroz 和 Shen(1999)提出了“剪切梁”模型，对问

题作了简化. 如图 2 所示, 几何上, “剪切梁”为图 1 双梁模型的一半, 梁下底面通过厚为 h 的粘性夹层与刚性基础相连. 其边界条件为: 在梁的 $x=0$ 端, 作用力载荷 $T=\tau_{yx}(0)A$, $A=bt$, $x=L$ 为自由端; 忽略梁的弯曲效应, 且引入 z 向位移为常数的假设: $w=w(x)$, 且 $\partial w/\partial z=0$, $G_2 \rightarrow \infty$, $G_1=G$. 梁是弹性的, 即

$$\tau = -G \frac{dw}{dx} \quad (4)$$

弹性梁的应力 τ 与梁下底面粘性夹层中的应力 τ_f 形成自平衡系统(Jorzebowski, Mroz, 1994), 即有如下关系式成立:

$$A \frac{d\tau}{dx} + b\tau_f = 0 \quad (5)$$

式中, $A=bt$. 对式(4)和(5)中的几何参数及位移变量做参照 t 的无量纲化后, 可得到

$$\frac{d\tau}{dx} + \tau_f = 0 \quad \frac{d^2w}{dx^2} - \frac{\tau_f}{G} = 0 \quad (6)$$

Mroz 和 Shen(1999)证明了式(6)同式(1)~(3)所表示的力学系统是近似等价的. 在给定边界条件下, 结合给定的层间界面材料本构, 可以直接求解式(6), 对模型失稳阶段的计算也可以解析得到平衡路径上的位移及应力解.

2 关于结构失稳过程中能量释放的讨论

当层间界面上的损伤过程区与剪切梁的自由端接触之后, 此时的结构行为称为尾区行为. 尾区阶段的失稳行为是一种与材料本构特性有关的结构行为, 但并不是纯粹的材料行为. 失稳后结构的响应模式有两种: 回折失稳(snap-back)和软化失稳(snap-through). 具体模式由 Mroz 和 Shen(1999)导出的失稳发生条件判别式确定. 此判别式中既包含了材料性能参数, 又包含了结构几何参数和外部环境应力参数. 这说明了只有在结构形式、材料性能和外部环境共同作用下, 才可能发生回折失稳. 回折失稳发生时, 结构对外界的能量释放是一个重要的问题, 因为能量释放的正确计算是模型用于地震分析的前提. 图 3 为失稳后的位移-载荷曲线. 与想象的情况有些不同, 大家熟悉的回折失稳, 如 Yang 和 Ravi-Chander (1998)给出的结果等, 是图 3 中曲线 ADE 所示的形式. 本研究给出的某一特定参数值计算结果中的力载荷, 在回折失稳过程中下降至终态值以下, 这是一个重要的现象.

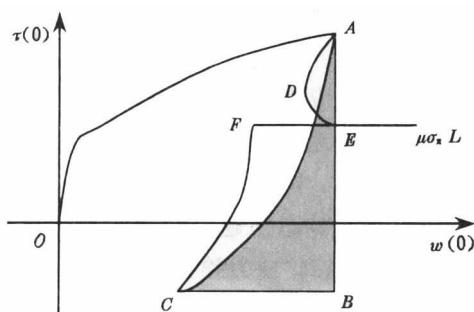


图 3 回折失稳过程中的位移-载荷曲线示意图

华安增(1989)和殷有泉(1993)分别给出了不同的失稳发生时, 结构对外界的能量释放计算公式. 我们认为, 仅从本构模型出发, 求解地震烈度的方法是欠妥的. 因为地震是一种结构行为, 地震烈度取决于包括地应力值、地质结构的尺寸以及材料特性等诸因素的综

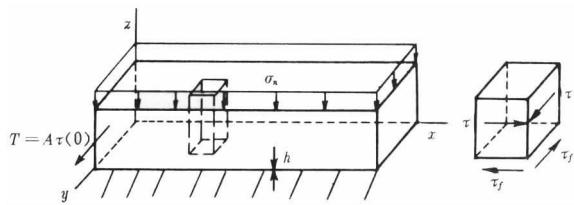


图 2 剪切梁模型

合影响。对地震烈度的预测计算，必须是基于上述诸因素的综合计算。回折失稳过程中结构对外界的能量释放过程，就是结构对外界做功的过程，因此，加载端反向位移标志着结构对外界的能量释放，释放的能量值则是图3中曲线ABCA围成的阴影面积，其计算公式为

$$E^R = \int_{w(0)_1}^{w(0)_2} \tau(0) dw(0) \quad (7)$$

式中， $w(0)_1$ 为反向位移行为开始时加载端的位移值， $w(0)_2$ 为反向位移行为结束时加载端的位移值； $\tau(0)$ 是加载端的剪切载荷值，包括地应力 σ_n 、材料参数 c_0 、结构尺寸 t, L 等诸因素的函数。软化失稳(snap-through)过程中，由于加载端没有反向位移，结构对外界的能量释放为0。释放能量计算式(7)由于综合计入了地应力值、地质结构尺寸以及材料特性等诸因素，因而物理上是较为合理的。

3 载荷循环过程中的载荷突变讨论

很多时候，结构的破坏是由于冲击载荷造成的。对于岩石结构来说，冲击载荷的来源可以是工程爆破作业等，但更多则来自于地质运动形成的“应力锁死”现象。

图4给出经历了加载—卸载—再加载循环后，沿界面层全长界面剪应力 τ_f 的分布示意及主要分区边界点的位置。图中， S_2 为加载损伤区前峰的位置， S_{52} 为再加载损伤区前峰的位置。在卸载过程开始后，由于弹性梁中产生的反力的作用，界面层上首先发生自加载端 $x=0$ 处开始的反向摩擦滑动， S_{52} 自左向右扩展。对于剪切梁模型，由于弹性梁中的剪应力与底部的内聚力层存在自平衡关系，从式(6)第1式可知，加载端 $x=0$ 处的剪应力载荷 $\tau(0)$ 的值是界面层上剪应力 τ_f 沿界面全长的积分，因此有

$$\tau(0) = \int_0^L \tau_f dx \quad (8)$$

再加载时的载荷增量为

$$\Delta\tau(0) = \int_0^{S_{52}} \Delta\tau_f dx \quad (9)$$

式(9)的对时间的导数形式为

$$\frac{d[\tau(0)]}{dt} = \frac{\partial[\Delta\tau(0)]}{\partial S_{52}} \frac{dS_{52}}{dt} \quad (10)$$

可以证明，式(10)中 S_{52} 为有限值。但是， dS_{52}/dt 的值在遭遇“应力锁死区”时却是无穷大。

结合图4可容易地说明这一点。

由图4可知，再加载损伤区前峰 S_{52} 自左向右扩展。对于静态问题， S_{52} 的扩展速度为常数。当 S_{52} 扩展到“应力锁死区”边界的位置 S_{32} 时，“锁死”的应力与再加载损伤区连通，导致再加载损伤区前峰 S_{52} 突然跳跃到“应力锁死”区的另一侧边界点 S_2 的位置。在这一过程中，有

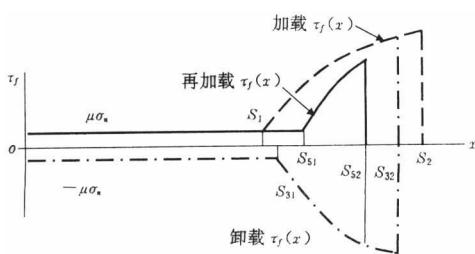


图4 界面层上 τ_f 分区边界点位置示意图

$$\frac{dS_{52}}{dt} \rightarrow \infty \quad (11)$$

结合式(11), 从而有

$$\frac{d[\Delta\tau(0)]}{dt} \rightarrow \infty \quad (12)$$

这一载荷跳跃体现在载荷-时间曲线图(图5)中对应为竖直向上的线段CD.

4 结论

层间界面在侧压力及反平面剪切载荷共同作用下, 剪切破坏(失效)的剪切梁模型能够综合反映岩层剪切破坏的主要特征, 因此, 可以用于地震的力学机理分析以及相关力学量的演变规律研究. 本文根据求解层间界面剪切失效问题的剪切梁模型, 讨论了有关地震研究的若干问题, 得到以下结论:

(1) 地震是一种结构行为, 地震烈度取决于包括地应力值、地质结构的尺寸以及材料特性等诸因素的综合影响, 对地震烈度的预测必须是计人上述诸因素的综合计算结果. 本研究初步给出的能量释放计算公式综合了以上诸因素, 物理上是较为合理的.

(2) 当界面层上的再加载区前峰趋近“应力锁死”区边界点时, 加载端 $x=0$ 处的载荷趋近于突变点, 此时预示地震可能发生. 因此, 观测断层上剪应力的变化, 尤其是剪应力变化区域边界点(前峰)的运动, 对于短期震前预测有重要意义.

(3) 当层间界面的长度很长, 或者由于其它原因, 界面层上含有多个“应力锁死”区域时, 加载端 $x=0$ 处的载荷突变会发生多次. 另外, 当一个地震带的地质结构系统含有多个剪切梁子结构时, 也会蕴涵多次载荷突变. 这也许就是余震的产生原理. 因此, 精确测量断层上剪应力的分布, 有利于预测地震发生的烈度及余震次数.

(4) 为预测地震而进行的观测重点应是断层面上剪应力的分布(大小、方向、作用区域范围等). 完好岩层中的地应力所记录的地层信息虽然与地震相关, 但不如断层面上的信息更直接, 因为毕竟地震是界面(断层)失效造成的.

(5) 当载荷突变发生时, 界面(断层面)上摩擦滑动区的运动趋于增强. 摩擦产生的能量耗散会引起局部温度的升高. 当该部分断层与水相联通时, 层间摩擦会引起水温升高; 当摩擦运动速度增快并导致断层上的粗糙面磨损时, 会伴有声波发射等其它可作为地震前兆的物理现象.

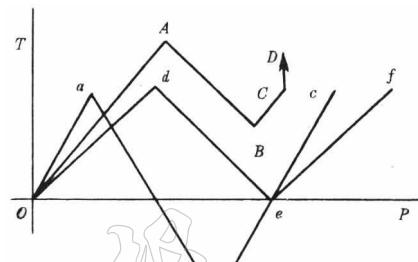


图5 周期载荷及载荷冲击示意图

参 考 文 献

- 杜兴信, 邵辉成. 1999. 由震源机制反演中国大陆现代构造应力场[J]. 地震学报, 21(4): 354~360
 华安增. 1989. 岩石冲击及能量释放[A]. 见: 孙钩, 林韵梅主编. 岩石力学新进展[C]. 沈阳: 东北工学院出版社, 220~229
 江在森, 祝意青, 王庆良, 等. 1998. 永登 5.8 级地震孕育发生过程中的断层形变与重力场动态图象特征[J]. 地震学报

- 报, 20(3): 264~271
- 焦明若, 张国民, 车时, 等. 1999. 中国大陆及其周边地区构造应力场的数值计算及其在地震活动性解释上的应用[J]. 地震学报, 21(2): 123~132
- 宋治平, 梅世蓉, 尹祥瑞. 1999. 强大地震前地震活动增强区及其力学研究[J]. 地震学报, 21(3): 271~277
- 殷有泉. 1993. 地震非稳定性[A]. 见: 中国力学学会办公室编. 结构与材料的不稳定性[C]. 北京: 科学出版社, 174~185
- 曾海容, 宋惠珍. 1999. 利用三维有限单元格林函数反演 1989 年 Loma-Prieta 地震的震源机制[J]. 地震学报, 21(3): 225~232
- Hutchinson J W, Suo Z. 1991. Mixed mode cracking of layered materials[A]. In: Hutchinson W, Wu T Y eds. *Adv Appl Mech*, 29[C]. New York: Academic Press, 63~191
- Jorzebowski A, Mroz Z. 1994. On slip and memory rules in elastic, friction contact problems [J]. *Acta Mech*, 102(1): 119~216
- Mroz Z, Shen X P. 1999. Analysis of progressive interface failure under monotonic loading[A]. In: Xu B Y, Tokuda M, Wang X C eds. *Microstructures and Mechanical Properties of New Engineering Materials*[C]. Beijing: International Academic Publisher, 109~114
- Shen X P, Mroz Z. 2000. Analysis of progressive interface failure under cyclic loading[J]. *Adv in Struc Engng*, 4(accepted)
- Yang B, Ravi-Cander K. 1998. Anti-plane shear crack growth under quasi-static loading in a damaging material[J]. *Int J Solids Struct*, 35(12): 3 695~3 715

AN INTERFACIAL MECHANICAL MODEL FOR THE ANALYSIS OF EARTHQUAKE

Shen Xinp¹⁾ Zenon Mroz²⁾

1) Department of Mechanics, Northeastern University, Shenyang 110006, China

2) Institute of Fundamental Technological Research, Polish Academy of Sciences, 00-049, Warsaw, Poland

Abstract: In this paper, the shear beam model for analysis of interface failure under joint action of anti-plane shearing and lateral compression and its principal behavior were briefly introduced. The calculation of energy release that is related to the strength of earthquake was presented by using the shear beam model. The sudden increase of load resulted from the “stress locking” at the interface layer in the reloading process was investigated. At the end of the paper, discussions on the mechanism of earthquake were given out.

Key words: interface failure; shear beam model; stress locking; sudden variation of load; instability; earthquake