

岩层层间界面载荷突变及能量释放特性研究

沈新普¹, 徐玉秀¹, 邢怡文²

(1. 沈阳工业大学建筑工程系 辽宁 沈阳, 110023; 2. 北京机械局投标公司, 北京, 100006)

摘要: 应用剪切梁理论, 研究了在定常侧压力和周期性的反平面剪切载荷共同作用下, 岩层层间界面载荷突变及能量释放特性。由于宏观裂纹前方损伤过程区的存在, 当卸载过程不能覆盖加载过程造成的损伤区时, 会产生“应力锁死”现象。而当后续再加载过程区的前锋与“应力锁死区”相接时, 会产生载荷突变, 从而导致冲击载荷的发生。

关键词: 层间界面; 裂纹; 损伤; 应力锁死; 冲击载荷
中图分类号: O 342 **文献标识码:** A

0 引言

在反平面剪切载荷及侧压力共同作用下, 层间裂纹及其扩展所导致的层间失效是岩石工程中重要的结构失效模式。最近文^[1]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。文献[2]进一步给出了在单调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。文献[3]则给出了卸载及再加载过程中, 层间界面上的力学特性及其变化规律。

本文将首先简要介绍文献[4]提出的剪切梁模型的主要力学行为特性。在此基础上, 分析再加载过程, 及由于层间界面上卸载“应力锁死区”产生的载荷突变, 并进一步讨论失稳阶段结构对外界的能量释放量。

由文献[5], 相应于一个载荷循环(本文假定为力载荷循环), 层间界面上将发生以下过程:(1). 单调加载过程;(2). 卸载(或反向加载)过程;(3). 再加载过程。

按照文献[6]的简化假设, 弹性梁中的剪应力 t 与梁下底面的粘性夹层中的剪应力 t_f 形成自平衡系统^[7], 在以上三个过程中, 剪切梁模型的以下基本关系式总是成立的:

$$= -G \frac{dw}{dx}, \quad \frac{d}{dx} + t_f = 0 \quad (1)$$

式中 G 为弹性梁材料的剪切模量, 周期载荷属于复杂载荷, 又由于损伤区的存在, 这一过程属于

非弹性过程, 应力状态与加载历史有关, 一般地讲, 应该用增量形式的本构描述。但由于式(1)所示关系的存在, 使得我们可以使用全量形式的方程计算周期载荷下剪切梁内的各力学量。

1 再加载过程分析

再加载过程与卸载过程相比, 有一定的类似之处。再加载过程包含以下 4 个阶段:(1) 自加载端 $x=0$ 处开始的再加载正向摩擦滑动;(2) 滑动区到达卸载二次损伤区并向前扩展进入该区;(3) 再加载三次损伤区形成并向前扩展, 与卸载一次损伤区相连接;(4) 再加载二次损伤区形成并扩展, 形成再加载一次损伤区。

对应一个典型的再加载过程, 根据不同的应力状态及应力历史, 沿界面层全长可分为下述的几个区段:(1) 再加载摩擦滑动区, $0 \leq x \leq s_{51}$;(2) 再加载三次损伤区, $s_{51} \leq x \leq s_{52}$;(3) 再加载二次损伤区, $s_{52} \leq x \leq s_{42}$;(4) 再加载一次损伤区, $s_{42} \leq x \leq s_{62}$ 。

图 1 给出了再加载过程中沿界面层全长剪应力 t_f 主要分区边界点的位置。从图 1 可以看出, 当再加载过程不能完全覆盖卸载损伤时, 应力“锁死”现象不仅还会存在, 而且会有两个应力锁死区形成。

2 “锁死应力”的释放与载荷突变

图 1 给出了经历加载 - 卸载 - 再加载循环后沿

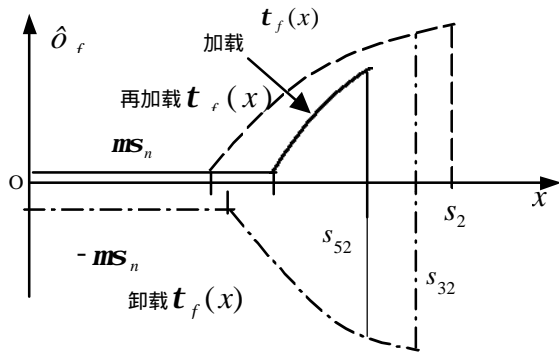


图 1 界面上 t_f 分区边界点位置示意图。

Fig.1 the position sketch of boundary point t_f in 界面上全长界面剪应力 t_f 的分布示意及主要分区边界点的位置。图中 s_2 为加载损伤区前锋的位置, s_{52} 为再加载损伤区前锋的位置。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(1)可知, 加载端 $x=0$ 处的剪应力载荷 $t(0)$ 的值是界面上剪应力 t_f 沿界面全长的积分, 因此有:

$$t(0) = \int_0^L t_f dx \quad (2)$$

再加载时的载荷增量为

$$\Delta t(0) = \int_0^{s_{52}} t_f dx \quad (3)$$

式(3)的对时间的导数形式为:

$$\frac{d[\Delta t(0)]}{dt} = \frac{\partial [\Delta t(0)]}{\partial s_{52}} \frac{ds_{52}}{dt} \quad (4)$$

可以证明式(4)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 1 可容易地说明这一点。

由图 1, 再加载损伤区前锋 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锋 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

$$\frac{ds_{52}}{dt} \rightarrow \infty \quad (5)$$

结合式(4), 从而有

$$\frac{d[\Delta t(0)]}{dt} \rightarrow \infty \quad (6)$$

这一载荷跳跃体现在载荷 - 时间曲线图 (图 2) 中对应为竖直向上的线段 CD。

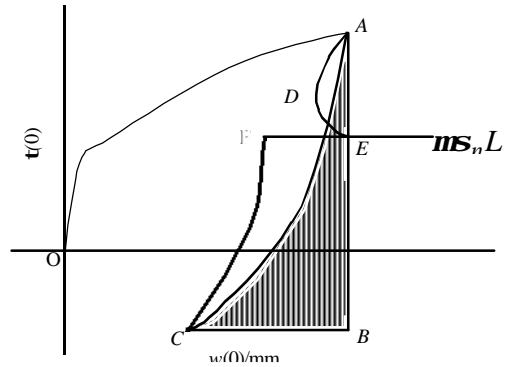


图 2 回折失稳过程中的位移 - 载荷曲线示意图

Fig.2 the curve of displacement-loading during the snap-back

3 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与结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: snap-back (回折失稳) 和 snap-through (软化失稳)。具体模式由文献[4、5]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, 这说明只有在结构形式, 材料性能, 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话题, 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 所示, 失稳后的位移 - 载荷曲线与想象的情况有些不相同, 大家熟悉的回折失稳是图 3 中曲线 ADE 所示的形式。文献[4、5]给出的某一特定参数值计算结果中, 力载荷在回折失稳过程中下降至终态值以下, 这是一个重要现象。

文献[8]和文献[9]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。因为对于这样一种结构行为,其能量释放烈度取决于包括地应力值、结构几何尺寸、材料特性等诸因素的综合影响。因此加载端反向位移标志着结构对外的能量释放,释放的能量值则是图3中曲线

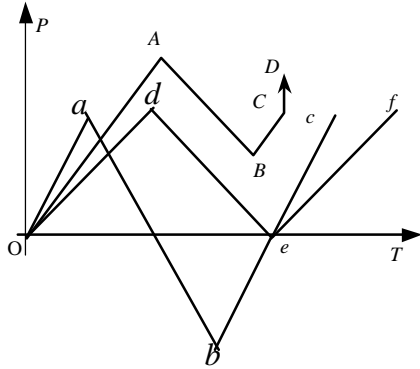


图3 周期载荷及载荷冲击示意图

Fig.3 sketch of cyclic loading and compact loading

ABCA 围成的阴影面积,其计算公式为

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

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, $t(0)$ 是加载端的剪切载荷值,为包括地应力 s_i , 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, 结构对外的能量释放为零。释放能量计算式(7)综合计入了地应力值, 地质结构尺寸, 材料特性等诸因素, 物理上是较为合理的。

4 结 论

本文在文[1,7]的基础上,应用“剪切梁”模型分析了由定常侧压力和循环反平面剪切载荷共同作用下由于层间界面上卸载“应力锁死区”产生的载荷突变,并进一步讨论了失稳阶段结构对外的能量释放量。

本文研究结果展示出,由于裂纹前方损伤过程区的存在,当周期载荷的再加载过程与“应力锁死区”相关联时,“锁死”的应力的释放会导致载荷跳跃,产生“冲击”,成为导致结构失稳的“源因”。

本文研究结果表明,结构失稳时的能量释放烈度取决于包括侧向压应力值、结构的尺寸、材料特性等诸因素的综合影响,对能量释放烈度的预测必须是计入上述诸因素的综合计算结果。

参考文献:

- [1] Zenon Mroz, Shen Xinpu. Analysis of progressive interface failure under monotonic loading[M]. In: B. Xu, M. Tokuda, X. Wang eds. Proc. of Inter. Conf. on Micro-Mech. & Mater. International Academic Publisher, Sept., Beijing, 1999, 109-114.
- [2] 沈新普, 泽鲁·穆荣日. 求解层间界面反平面剪切破坏的剪切梁模型(I) 基本特性[J]. 应用数学和力学, 2000, 21(11): 1101-1108.
- [3] Shen Xinpu, Zenon Mroz. Shear beam model for interface failure under antiplane shear (I)-fundamental behavior[J]. Applied Mathematics and Mechanics: English Edition, 2000, 21(11):1221-1228.
- [4] 沈新普, 泽鲁·穆荣日. 求解层间界面反平面剪切破坏的剪切梁模型(II) 失稳特性[J]. 应用数学和力学, 2000, 21(11): 1109-1116.
- [5] Shen Xinpu, Zenon Mroz. Shear beam model for interface failure under antiplane shear (II)- instability[J]. Applied Mathematics and Mechanics: English Edition, 2000, 21(11):1229-1336.
- [6] 沈新普, Zenon Mroz. 循环载荷下层间界面反平面剪切破坏卸载行为的解析解[J]. 东北大学学报, 2001, 22(1): 115-118.
- [7] Shen Xinpu, Zenon Mroz. Analysis of progressive interface failure under cyclic shear loading[J]. Advances in Structural Engineering, 2000, 4(3):9-20.
- [8] 华安增. 岩石冲击及能量释放. 1989. 见: 孙钧、林韵梅, 岩石力学新进展[M]. 沈阳: 东北工学院出版社, 220-229.
- [9] 殷有泉. 地震非稳定性[C]. 见: 中国力学学会办公室, 1993. 结构与材料的不稳定性[C]. 北京: 科学出版社, 174-185.

Investigation on Shocking Load and Energy Release of Rock Interface

SHEN Xin-pu, XU Yu-xiu, XING Yi-wen

(Dept. Architectural Engineering, Shenyang Polytechnic University, Shenyang 110023, China)

Abstract: With the shear beam model, it is investigated the source of shocking load and its energy release related properties. Because of the existence of the damage process zone ahead of the macro crack, stress-locking would occur if the unloading process can not erase the loading damage-process zone. And if the reloading front of damage process zone is being connected with the area of stress locking, the shocking load will happen.

Key words: interface; crack; damage; stress locking; shocking load