

斜坡发育过程中的 σ_3 效应

李 沛

(中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所)

提 要 斜坡发育过程中,正倾岩层的屈曲变形和水平岩层的塑性流动,受坡体内存在的最小主应力 σ_3 梯度作用而成。 σ_3 效应主要呈现有:屈曲滑坡和挤出型块体滑坡。

关键词 斜坡 最小主应力 σ_3 σ_3 效应

斜坡在发育过程中,由于受构造应力、自重应力和其他营力的长期作用,岩层的组合形态及相对位置在不断变化着。一种变化(即岩体蠕变)是应力恒定不变,变形随时间推移而发展;另一种变化(即松弛)是应变恒定不变,应力随时间推移而降低。正倾岩层和水平岩层在坡体内存在的最小主应力 σ_3 梯度长期作用下,岩体产生蠕变,由此而分别形成屈曲滑坡和挤出型块体滑坡。

一、柱 的 屈 曲

有学者^[1]指出:在压性荷载作用下,柱可能有一任意小的挠度值,且其在横向力移去后并不消失;在更大压性荷载值时,柱是不稳定的,并将毁坏,这种不稳定现象称为屈曲。

这表明有如下几个重要材料力学问题:1. 柱发生屈曲的力由压性荷载所引起,而不是柱自身的重力;2. 柱可能有一任意小的挠度值;3. 在很小的横向力作用下,柱产生不消失的挠度;4. 在临界荷载作用下,柱以弯曲形式,作横向变形而破坏,决非是直接压缩破坏。

坡体内当正倾岩层的长度与厚度之比达到极限值($>200:1$)时,即为材料力学中所说的一种“柱”,同样会发生屈曲变形。

二、正倾岩层的屈曲滑坡

(一)岩层的屈曲变形

在斜坡发育过程中,若坡体结构、坡高、坡度与斜坡岩层强度之间的关系已达到一定极限者,则岩层在重力或荷载作用下便有可能发生屈曲。

1. 重力屈曲

正倾岩层倾向与斜坡坡向之间的夹角 $0^\circ-30^\circ$,加之岩层倾角与斜坡坡度又大体相同者,坡体内一定深度处的岩层(尤其是薄层柔性碳酸盐类岩石、薄层砂岩和泥岩互层),在斜坡的前部(略高于坡底)可能会发生重力屈曲。屈曲发展到岩层极限强度时就曲溃,生

本文收稿日期:1991-08-05.

成屈曲滑坡(图 1)。

2. 推动屈曲

置于水平层状岩层基础之上的大坝,如果设计不合理或其他原因而使岩层性状发生变化,水库水体对大坝产生的水平推力可能会使坝下岩层产生滑移屈曲,以至毁坏大坝。

(二)正倾岩层屈曲过程中的 σ_3 效应

叙述前面内容的目的在于建立一个如下这样的概念:长条状材料和岩层两者的屈曲都是材料力学的一种固有属性。正倾岩层屈曲滑坡的发生是这种材料力学属性以形体转换方式演化的结果。

1. 简单的屈曲实验

1) 均布荷载作用下物体的压缩变形

图 2 是一定长度的橡胶管在同心荷载作用下所产生的变形。在橡胶管中央的横截面处,管壁向自由空间作 360° 环形突起,突起值各处均等。若在橡胶管的下部置一刚性平面

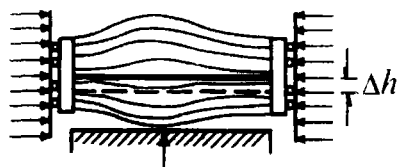


图 2 橡胶管的压缩变形

Fig. 2 Compressive deformation of a rubber tube

粗虚线、粗实线分别为实验前后的橡胶管轴线

变

面后再施加同心荷载,橡胶管的变形则略有变化:受刚性平面限制的下部管壁膨胀所产生的推力,而使橡胶管向上运动 Δh 。由于橡胶管两端的滑块可自由滑动,所以在均布荷载作用下橡胶管仍能保持稳定状态。这表明:实验体在压应力作用下,若受侧限,就会向与侧限体相反方向运动。

2) 水平同心荷载作用下长条状材料的应力应

变

将一弹性长条状材料置于水平刚性槽中。设定材料与刚性槽壁间无摩擦力。在三个面具侧限的条件下,长条状材料受水平同心荷载的作用,而发生向上拱起。

拱起变形机制大致为:在足够的水平集中荷载(即最大主应力 σ_1)作用下,长条状材料应力应变(图 3)与前述的橡胶管应力应变相似。长条状材料左右两个侧面的膨胀应力(即第二主应力 σ_2)大小相等,方向相反,彼此抵消,不会引起长条状材料的变形。唯有底面产生的膨胀应力(即最小

主应力 σ_3)才把长条状材料向上(即向顶面)顶推 Δh 。由于“只要有一个很小的横向应力的作用,将产生不消失的挠度”^[1],因而 σ_1 的作用线未能与长条状材料的轴线重合,把 σ_1 由同心荷载变为偏心荷载。长条状材料在偏心荷载作用下产生弯矩,呈现向上拱起的屈

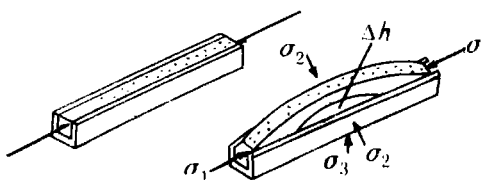


图 3 简单屈曲实验示意

Fig. 3 A simple experiment of buckling

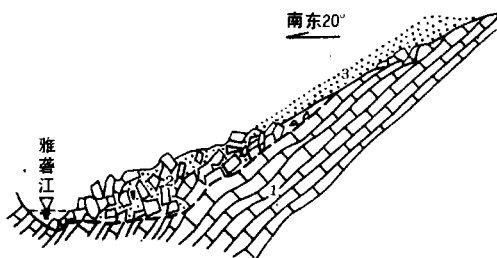


图 1 雅砻江霸王山古屈曲滑坡

Fig. 1 An ancient buckling landslide at Dawangshan, Yalongjiang River

1. 灰岩; 2. 滑坡堆积体; 3. 滑动前的地形

曲。

在 σ_3 作用下,长条状材料产生的这种屈曲应力应变过程被称为 σ_3 效应。

2. 正倾岩层的屈曲滑坡的生成

前述的这些实验可见,在局部侧限条件下,屈曲拱起是 σ_3 效应的结果。

野外观察所见,类似长条状材料屈曲的,正是正倾岩层的屈曲滑坡。在较长的斜坡上,若薄层正倾岩层倾向和斜坡坡向基本一致,而且岩层倾角与斜坡坡度大体相同,由于 σ_3 效应的存在,则同一岩层的下段岩体在上段岩体重力分量(相当于外力)的作用下,可能会在略高于坡底处发生屈曲滑坡。

与长条状材料应力应变过程相比,在重力分量作用下,坡脚处正倾岩层应力应变过程的不同点是,两侧限制面和底部岩层接触面上存在着摩擦力,由此使临界荷载增大。

但又有削弱岩层稳定性的下列因素:1)页岩、泥岩、泥灰岩等软弱夹层及岩层构造褶曲有利于岩层的屈曲发展;2)构造层间错动削弱了岩层层面间的抗剪强度,以致达到残余抗剪强度;3)季节性融冻作用和风化作用可促进屈曲发展;4)暴雨产生的“水劈”作用增大坡脚岩层的水平推力和挠度,加快屈曲发展。

至今对斜坡岩层屈曲破坏的研究仍很不够。20世纪70年代,沃顿(G. Walton)和库特(H. K. Kutter)对边坡屈曲破坏作过论述^[2]。

库特把荷载分布和边界条件加以简化后,估算过斜坡屈曲极限长度(图4)。

他定斜坡岩体的屈曲(临界)荷载(重力分量)

$$P = Lt\gamma \cos \alpha (\tan \alpha - \tan \varphi), \quad (1)$$

式中 L 为岩层长度; t 为岩层厚度; γ 为岩石容重; α 为斜坡坡度; φ 为顶部岩层及其下伏岩层间的摩擦角。

库特认为,斜坡坡面上的顶部岩层的屈曲与前述的柱的屈曲相似。

欧拉定理给出的屈曲(临界)荷载

$$P_{cr} = \pi^2 EI / (0.7L)^2, \quad (2)$$

式中 E 为岩石的弹性模量; I 为惯性矩; π 为圆周率(3.14); L 的含义同前。

库特将式(1)代入式(2),得屈曲极限长度¹⁾

$$L = [\pi^2 E t^2 / 6 \gamma \cos \alpha (\tan \alpha - \tan \varphi)]^{1/3}. \quad (3)$$

当然把岩层的屈曲近似地看作柱的屈曲,是可以的。

但必须强调指出的是:1)式(1)计算的是,图4中实线部分所示的斜坡几何条件下岩体的重力分量,式中的 L 是产生屈曲的岩体长度,而不是使岩体屈曲的上部(图4中虚线

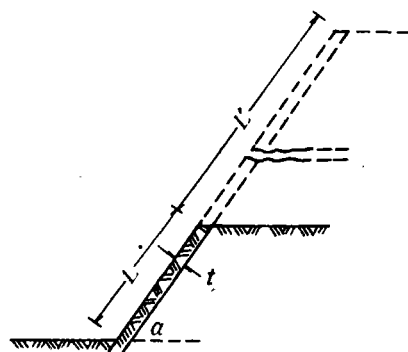


图4 斜坡屈曲极限长度的计算要素
(引自参考文献[2],作过修改)

Fig. 4 Calculating elements of the critical length of buckling in an anacline bedded slope

实线部分是原图的,虚线部分是后加的

1)参考文献[3]中的屈曲极限长度

$$L = [\pi^2 E I / 0.49 t \gamma \cos \alpha (\tan \alpha - \tan \varphi)]^{1/3}.$$

部分)岩体的长度 L' 。因此式(1)中的参数 L 选择有误,应当选择图4中虚线部分所示的 L' 。2)式(2)中的 L 是柱的已知屈曲长度(即已知数),相当于图4中实线部分的岩体长度。在斜坡上, L 与 L' 并不属同一段岩体, L 在下部, L' 于上部。故不能将式(1)代入式(2)。

至此可以说,屈曲是材料(或斜坡下段岩体)在外力(或斜坡上段岩体的重力分量)作用下产生的应力应变过程。坡体内发生屈曲的,并不是由坡顶至坡脚的全部岩体,而仅是坡脚处的岩体。单靠坡脚处岩体的重力分量不仅不能发生屈曲,而且还阻碍屈曲发生。自身的重力分量不可能产生屈曲,唯有在上段岩体足够的重力分量作用下才能产生屈曲。

三、水平岩层的挤出型块体滑坡

(一)挤出型块体滑坡现象

水平或近于水平的软弱岩层(粘土和软岩),在上覆坚硬岩层的均布重力作用下会产生塑性流动,并朝临空方向挤出,于是上覆坚硬岩层就下陷、拉裂、解体和缓慢滑动。这样形成的滑坡称挤出型块体滑坡(图5)。我国对这类滑坡研究得还不够,而捷英美苏等国研究得较深入。挤出型块体滑坡的形成,主要受软岩的力学性质控制。

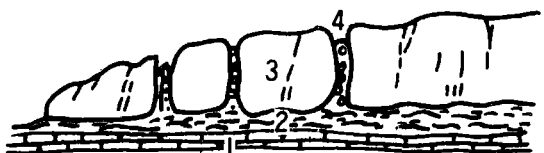


图5 挤出型块体滑坡(引自参考文献[4],作过修改)

Fig. 5 An extruded block landslide

1. 灰岩; 2. 页岩; 3. 灰岩块体; 4. 裂缝及其中的充填物

(二)塑流的机制

粘土或软岩在上覆坚硬岩层的均布重力作用下,呈现特有的挤出破坏过程叫塑流。

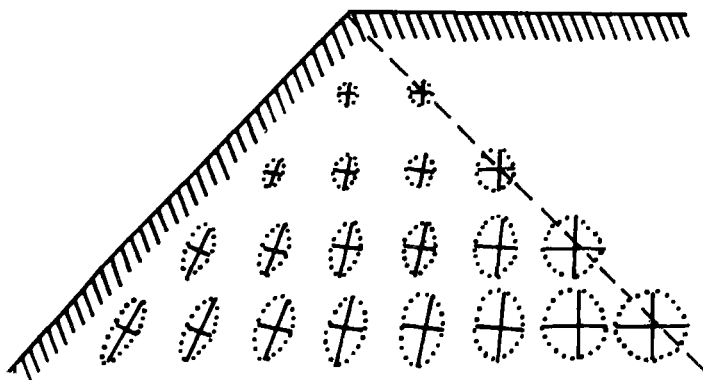


图6 斜坡的理论应力场(适合于侧压力系数 $\lambda_0 = 1$, 坡度 $\alpha = 45^\circ$ 。引自参考文献[5],略有改动)

Fig. 6 Theoretical stress field of a slope

1. 粘土及软岩的挤出破坏机制(σ_3 效应)

斜坡的理论应力场(图6)有三个主要特点:1)坡顶处的应力圆内最大主应力 σ_1 与最

小主应力 σ_3 几乎相等,且在近斜坡坡面处的 σ_1 倾斜不明显,由坡缘至坡脚处 $\sigma_3 < \sigma_1$, σ_1 倾向斜坡坡面, σ_1 倾角渐近斜坡坡度;2)在横向上,斜坡坡面处的应力圆呈椭圆形($\sigma_3 < \sigma_1$),坡体内部的应力圆渐呈标准圆形($\sigma_3 = \sigma_1$);3)斜坡坡面处的 σ_1 和 σ_3 之差值与坡高成反比。因此在坡脚处的水平线上呈现 σ_3 梯度,其极值出现在坡脚边缘(临空面)处。

由临空面向坡体内部,上下坚硬岩层间的软弱岩层中,任取一个单元岩土体A(以下简称单元体A,图7),以分析其应力应变性状。

单元体A可视为,以水平面为界的半空间截面中的一个微分体,其上承受着上覆坚硬岩层的均布荷载(重力)。若单元体A的前后左右都暴露在空气中,则单元体A在轴向(垂向)压力作用下,可作横向(水平方向)自由膨胀,并不产生侧向应力。实际上,这里的单元体A处于坡体内部,受周围岩土体限制,不能作横向自由膨胀。周围岩土体对单元体A势必会产生侧向应力 σ_3 ,以使单元体A保持侧向应变为0。土体的侧压力系数 $\lambda_0 \approx 1$,故单元体A的应力状态近于静水应力状态,即 $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ 。

至于单元岩土体A'(以下简称单元体A',见图7)的应力应变性状则如后。单元体A'处于斜坡坡面上,一面临空。在X轴的正方向上,单元体A'可作横向自由膨胀,这时 $\sigma_3 = 0$;在X轴的负方向上,单元体A'受连续岩土体限制而不能作横向自由膨胀,侧向应变仍为0,但连续岩土体对单元体A'会产生一个侧向应力,这时 $\sigma_3 \neq 0$ 。于是在X轴水平方向上呈现出应力梯度(即 σ_3 效应),粘土或软岩就会像液体一样“流动”,在临空面一侧往外缓慢挤出。这一破坏的特点是:既没有明显的破坏荷载,又无统一的破裂面,只有固体颗粒的相互错位。在X轴(水平)方向上,临空面处应力梯度最大,往坡体内部应力梯度递减,以至近于0。

2. 挤出型块体滑坡的生成

若上下水平坚硬岩层之间为粘土层,则 σ_3 效应使临空面处的粘土向外挤出。由此从临空面向坡体内部出现:粘土挤出量递减,粘土层厚度变薄量渐小,上覆坚硬岩层沉陷量也递减。于是上覆坚硬岩层就出现像悬臂梁似的弯曲变形。随着上覆坚硬岩层沉陷量的递增,挠度和悬臂长度又达到极限值者,则上覆坚硬岩层顶面(坡地表面)承受的拉应力超过岩体的抗拉强度而破裂。裂口向下逐渐扩大,便将上覆坚硬岩层分割成众多的独立块体,块体像浮船一样随粘土层流动而滑动。挤出型块体滑坡就是如此生成的。

粘土被挤出后,粘土层顶板会倾向临空面。因此滑体除作浮船运动外,还在下滑力作用下继续朝临空面方向运动。这有利于挤出型块体滑坡的进一步发展。

目前的 σ_3 效应分析仅是定性的,日后应加强定量分析和实验研究。

参 考 文 献

- [1] S. 铁摩辛柯, J. 盖尔(胡人礼译), 1978, 材料力学, 科学出版社, 第416—417页。

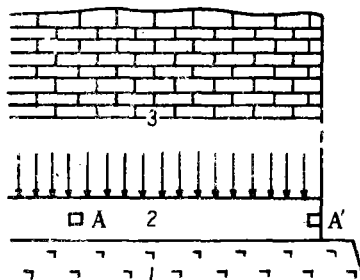


图7 产生挤出型块体滑坡的理想剖面
Fig. 7 An ideal section occurring extruded block landslide

1. 玄武岩; 2. 页岩; 3. 灰岩; 箭头示均布重力

- [2] H. K. 库特(李世平译),1981,边坡非纯滑动型破坏的机理,见:L. 米勒主编(李世平等译),岩石力学,煤炭工业出版社,第180—186页。
- [3] 重庆建筑工程学院、同济大学,1981,岩体力学,中国建筑工业出版社,第251页。
- [4] Q. 扎留巴、V. 门次尔(交通部科学研究院西北研究所译),1974,滑坡及其防治,中国建筑工业出版社,第76页。
- [5] E. П. 叶米里扬诺娃(铁道部科学研究院西北研究所译),1986,滑坡作用的基本规律,重庆出版社,第11页。

σ_3 -EFFECT OF LEAST PRINCIPAL STRESS IN THE SLOPE DEVELOPING PROCESSES

Li Pei

(*Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences*
& Ministry of Water Conservancy)

Abstract

σ_3 -effect is mainly expressed as two kinds of landslide phenomena.

1. Buckling landslide in anacinal bedded rocks

The test results of the long strip test piece in rigid channel shows that there exists the second principal stress σ_2 along the channel walls of both sides, which are opposite in direction and equal in effects to limit the lateral expansion of test samples due to axial stress σ_1 ; the least principal stress σ_3 would be formed while the channel bottom is upward, and it would push up the samples to occur deflection and bending-moment while the axial stress σ_1 deviates the axis of the test samples, and a upward yield-bending phenomenon will be formed.

The field investigation results; on the long slope, while the dip angle of the thin and anacinal bedded rocks equals or approximates to the slope angle of the slope surface, and the dipping direction of bedded rock equals basically to the slope direction, there occur yield-bending deformation and even buckling landslide at the foot of the slope because σ_3 -effects exists.

2. Crushing landslide in the horizontal bedded rocks

On the border of the slope, the differential unit rock and earth bodies (clay or soft rock) could expand freely to outside, which is freeing, while it is pressured uniformly by the gravity from the upper hard rocks of the slope, e. i. $\sigma_3 = 0$. There exists the lateral stress while the expansion is limits at the internal side, e. i. $\sigma_3 \neq 0$.

Thus, a stress difference (stress gradient) forms between the two sides of the unit rock and earth bodies. Under the action of the stress gradient, the unit rock and earth bodies are slowly crushed to outside and the upper hard rocks, as a mass, creep with the unit rock and earth bodies to form crushing landslide.

Key words slope, least principal stress σ_3 , σ_3 -effect, buckling landslide