

56.543
03857

岩石力学增量计算

[加拿大] D.F. 科茨 著
M. 吉恩

3
9

中国建筑工业出版社。

2014年
12月
第12期
第12卷
第12期

岩石力学增量计算

王德胜、王德胜、王德胜
王德胜、王德胜、王德胜



中国科学院图书馆藏

岩石力学增量计算

[加拿大] D.F. 科茨 著
M. 吉恩
姜俊城 译 王福民 校

中国建筑工业出版社

本书共五章，主要介绍以岩石力学理论研究成果为基础，并根据过去的经验数据进行新工程推算的方法。其中包括各种边坡稳定性计算；爆破振动、破碎及空气冲击波的作用的计算；地下工程开挖、支护、矿柱稳定及矿块崩落计算；地表沉陷各种问题的计算等。所介绍的方法是一种简易可行，又有相当准确性的计算方法，可供矿山、水利、道路工程方面的技术人员使用，亦可供大专院校师生参考。

INCREMENTAL DESIGN IN ROCK MECHANICS

D.F.Coates M.Gyenge

Mines Branch Monograph 880

1973

*

*

*

岩石力学增量计算

姜俊城 译 王福民 校

*

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

*

开本：787×1092毫米 1/32 印张：4³/₈。字数：98 千字

1983年8月第一版 1983年8月第一次印刷

印数：1— 4,800册 定价：0.60元

统一书号：15040·4522

译 序

增量算法本来是岩土工程非线性数值分析方法中的一种,本书作者将此法加以引伸和简化,试图用于各种岩石力学问题上。其实质是:在某项工程已经具备了一定的试验资料和经验数据的基础上,推断相同条件下新工程的数据,从而简化计算过程。作者认为,任何已经付诸使用的工程或生产矿山,都有多年的实践经验,掌握着丰富的经验数据。在此基础上,即可以现有的情况为初始量,而以相同条件下的新情况为增量进行推算。例如岩石的物理性质相同,推算延深后的露天矿边坡角;又如岩石性质和巷道所在水平相同,推算加大断面后巷道的稳定程度等等。这对于远景规划中进行必要的估算来说,是简便易行的;对于老矿山的延深、扩建尤属需要,而且极为方便。

事实证明,目前岩石力学的研究与充分的实际应用还有相当距离。不少问题的解决仍依靠于经验判断,而按现有方法计算所取得的数据也往往是参考性的或比较性的。此法则以实际经验数据(或试验数据)为基础,考虑了各种变化因素,限定了约束条件,进行合理推断。更主要的是作者明确地在边坡、爆破、地下工程和地表沉陷几个方面,提出了计算原理和方程式,不失为一种新方法。当然,书中各项公式的可靠程度仍需验证,但这种验证却是简便易行的。尤其是现场工作人员,完全可以通过实际积累的资料和不断的工程实践进行验证,指出其正误,或予以完善发展。相信只要认真研究,持之以恒,是完全可以突破作者现有的一些论述,使岩石力学这门科学日臻完善,用于工程实践。

1983.2

前 言

在地壳中开采矿物资源时，采矿同其他工业活动的区别，首先在于它需要崩落并清除矿岩，其次是要维护管理围岩，此即崩落岩石和顶板管理。因此，采矿的基础科学是岩石力学。

然而，岩石力学是难度很大的科学领域，不易取得实际研究成果。这门学科还需要大力扶植，继续研究，不仅要训练采矿工程师而且还要训练地质、物理、机械、土木工程方面的人员。为此，编写了《岩石力学原理》的专著，首次于1965年由矿业局出版，现为第三版^①。法文版已由矿业局出版，西班牙文版已由马德里的Litoprint公司出版。

现在，尽管许多研究尚未真正发展成为工程上的工具，就已然编写了这部试图在顶板管理、岩石破坏方面为工程技术人员提供一些帮助的新书。这是因为这种“增量计算”的新方法的一些应用是以大量研究工作为基础的，这些方法业已引进岩石力学之中。这正是矿业局仍在继续努力工作的一部分，目的是将积累的资料付诸使用，从而确保加拿大矿物资源的合理使用。

校长 J.康维

加拿大渥太华

1973.7

① 该书系本书作者之一D.F.科茨所著，其1970年版已由雷化南等译为中文，冶金工业出版社1977年出版。——译者

目 录

1. 绪论	1
2. 边坡	3
2-1 概述	3
2-2 不稳定性	5
2-3 地下水	8
2-4 平面剪切破坏	9
2-5 旋转剪切破坏	12
2-6 岩块流动破坏	15
2-7 边坡支护	18
3. 爆破	26
3-1 概述	26
3-2 能量分布	28
3-3 冲击作用	29
3-4 气体作用	30
3-5 爆破破碎作用	31
3-6 爆炸漏斗试验	34
3-7 柱状药包	41
3-8 地层移动	45
3-9 对地下工程的影响	46
4. 地下工程	52
4-1 概述	52
4-2 平峒(隧道)	54
4-3 冒落和岩石松动	58
4-4 周边爆破	61

4-5	支护	63
4-6	地下水	68
4-7	高压隧洞	70
4-8	应力集中区	73
4-9	矿柱	77
4-10	矿柱荷载	78
4-11	矿柱强度	81
4-12	破坏概率	82
4-13	顶、帮稳定性	95
4-14	崩落	98
5.	地面下沉	105
5-1	概述	105
5-2	导言	107
5-3	缓倾斜矿体	109
5-4	下沉坡度	117
5-5	水平位移	119
5-6	应变	121
5-7	急倾斜矿体	123

1. 绪 论

本书旨在帮助设计和施工工程师应用岩石力学这门学科。在理论和岩石试验方面已进行了大量的研究。在利用这些基本的成果进行实际判断时，必须认识到现有的局限性。象建筑设计那样对岩石结构进行全面地设计是不太可能的。然而，岩层变化的影响是能够预测的，这就产生了增量计算的原理。

增量计算是一个从已知到未知的推断过程，或是对现有生产中的变化进行形势预测的过程。这样，从实验中所得到的具体的原岩力学性质的知识，就可以用于未来的设计要求。目前，在采矿领域内这种方法的应用还是自发的，它没有完善的稳定性理论，并且由于条件在不断地变化，而很难进行理论上的最优设计。在实际范围内，显式增量计算的变换能使这个方法转变成更有效的单元运算组合。

现在让我们来考察一下露天矿边坡的设计。假定某一铁矿体下盘是急倾斜的白云岩，而且在同一矿体内，旧有露天矿已在400英尺的深度上揭露出白云岩竖向自然坡面是 72° ；还假定要建设一个最终深度为1000英尺的新露天矿，必须确定在白云岩中的平均边坡角。构造钻探表明：没有足以发生滑落的大弱面。这就有可能从旧有露天矿所获取的数据外推，估算出具有与旧有露天矿所试验边坡稳定性相同的新露天矿的平均边坡角。假如在这两个采区内，采前的应力条件是相同的，则所计算的新露天矿等效边坡角为 51° 。

再来考察一下由于爆破而产生的可能影响到建筑物及地下工程的运动。根据在现场测量的在一定装药量时的加速度、速度、位移、至建筑物的距离以及岩石的性质，推导出了些方程。可以用这些方程从某一具体现场测量数据中外推出不同装药量或不同距离时的使用情况。例如，在离爆破中心200英尺处，单次迟发爆破80000磅炸药，在地面以下5英尺测得最大径向速度是8英尺/秒，而在离建筑物1000英尺处，进行一次7000磅炸药的单次迟发爆破，可能是对建筑物有损坏的，按照以前的测量进行外推表明，后者的速度应为0.4英尺/秒（而0.2英尺/秒才能认为是安全的）。

另外一方面，假定回采一个水平缓倾斜矿体，要改变其有效的采矿场跨度。矿体被一系列垂直的厚岩脉所分割，岩脉走向与矿体走向相平行。在岩脉之间用房柱法进行回采。在新区段，岩脉之间的距离是1000英尺，而不是以往的400英尺，400英尺时，50个矿柱中约有一个矿柱损坏。通过对矿柱荷载、强度以及这些数值的变化所作的假设，采用和以前一样尺寸的矿柱和矿房，则预计新开采区的矿柱的破坏概率为50个矿柱内约有2个矿柱被破坏。在这种情况下，则以修改采场布置为宜。

采用这些方法之后，假定在两种情况下的采矿和地质界限是相同的，则可以进行数量上的预测。在许多情况下，根据有经验的工程师的判断可以得到所需数值，但在有些情况下并非如此。尽管增量计算预测的准确性不很高，但是它为相应的设计活动打下基础。在以下的各章节内试图说明增量计算的原理。然而，重要的不是文中所提出的一些例子乃至一些公式，而在于通过这些实例和公式的引导，使矿山工程师能自行研究、发掘这一原理的应用，更多地用于实践。

2. 边 坡

2-1 概述

凡是影响生产或需要重新修定边坡的任何不稳定性都叫边坡破坏。例如，一个边坡大部分破坏，只需在其几何尺寸上进行些小的调整即可，而不影响生产。相反，高陡坡工作面甚至还没有明显的破坏，却已影响了生产。这种情况，加之确定包括各种构造特征的原岩强度的困难，突出了增量计算对于岩石边坡的特殊意义。因此能用理论去进行有根据的外推，而这种外推在实际条件和假定条件之间的差异比起试图用基本原理进行完整的计算要小。

通常出现的与临界构造不连续有关所引起的不稳定性，业已建立了临界高度和边坡角之间的关系式^[1]，基于这些关系式，下面的增量计算方程式可以用来从已开挖的边坡外推到地层条件相同的尚未开挖的边坡

$$i_2 = (i_1 - b_1) \left(\frac{H_1}{H_2} \right)^{1.5} \left(\frac{A_1}{A_2} \right) + b_2$$

式中 i —— 边坡角；

b —— 是临界不连续面倾角；

H —— 边坡高度；

$$A = b - f \left[1 - 0.1 \left(\frac{D}{H} \right)^2 \right],$$

f —— 沿倾角为 b 的斜面的摩擦角；

D —— 是边坡边缘后的，地下水位；

脚码1——是以容许的稳定性（或不稳定性）程度表示的已知边坡参数；

脚码2——表示新边坡，其边坡角 i_2 是根据与1有相同稳定性程度所计算的。

由于在土壤中所发生的破坏方式通常是旋转剪切，可以采用相似的方程式：

$$i_2 = \left(\frac{H_1}{H_2} \right) (i_1 - B_1) + B_2$$

式中 H ——高度，如果在眉线以上有过载废石，则 H 为当量高度；

$$B = f \left(1.2 - 0.3 \frac{D}{H} \right) - 15.$$

眉线的变形可作为另一个容许边坡状况的判据。在这种情况下，可以采用下面方程式进行增量计算：

$$\tan i_2 = \tan i_1 \left(\frac{K_1 H_1}{K_2 H_2} \right)^2$$

式中 K ——回采前原岩的水平应力与垂直应力之比。

与这种从试验外推的计算方法相一致的是陡于容许的岩石边坡角的支护设计。在某些情况下，采用较陡的边坡是较为合算的，可以用在开采方面节省的一些经费装设确保有相等稳定性的支护系统。岩石锚杆系统可以采用下面的方程式进行计算：

$$P = \frac{WS(\sin i - s \cdot \cos i \tan f)}{J[\cos(i+5) + \sin(i+5)\tan f]}$$

$$S = \frac{PJ[\cos(i+5) + \sin(i+5)\tan f]}{W(\sin i - s \cos i \tan f)}$$

$$L_j = \frac{[H - (n-1)H_b] \sin(a-1)}{\sin a \sin(i+5)} + 15$$

式中 P ——锚杆所需要的能力；
 W ——每英尺边帮所要支护的岩石重量；
 i ——无支护的稳定边坡角；
 S ——一个台阶上的锚杆间距；
 f ——沿倾角为 i 的斜面的内摩擦角；
 J ——在一个垂直断面内锚杆的数目；
 H ——边坡高度（英尺）；
 a ——使用岩石锚杆时所能达到的较陡的岩石边坡角；
 s ——如教科书中所解释的，计入渗透影响的校正系数；
 L_j ——所要求的每个锚杆长度；
 j ——锚杆数量；
 H_0 ——台阶高度。

2-2 不稳定性

传统的破坏概念是当应力超过材料强度时则材料破坏。对于岩石边坡，根据其应力超过岩石强度的类型破坏的分类如图2-1所示。

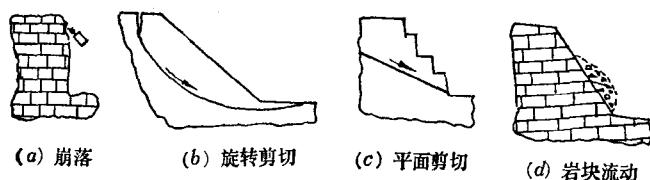


图 2-1 岩石边坡破坏按作用过程分类

(a) 破坏是由于松散和剥落的结果；(b) 这种破坏要求有象在土壤中那样的变形，然后产生破坏圆弧；(c) 最普通的破坏作用过程，即沿断层、节理、层面、以及类似的构造滑落；(d) 由于开采发生变形，致使原岩破碎和崩落而引起边坡破坏

与此同时，实际上的破坏结果却未必受理论概念的约束。例如：按照图2-1的破坏方式可能没有影响露天矿的生产，少量的岩石崩落还是允许的，而更值得注意的是，包括大段边坡在内的这种破坏，可能正好对边坡的几何尺寸形成局部调整。相反，没有前述四类中任何一种明显的破坏，高而陡峭的工作面仍会影响生产。因此有人曾提出这样定义：凡是影响生产或者是要求重边坡新修改边设计的都叫破坏。这使问题更加明确，然而对边坡破坏问题的分析与预测并没有什么帮助。

必须承认，另外一个复杂的因素是地质情况不易用力学概念去描述。其实，岩石材料强度即一块固体岩心强度，在实验室很容易测定，而岩层强度在现场却很难测试。并且，可能影响开采后边坡中应力分布的采前应力状况不仅测定时很费钱，而且在许多情况下它如同矿物成分或岩层中的构造特征一样复杂。

综上所述，岩石边坡的增量计算是很有价值的。实际上是根据在试验中已确定的岩层物理力学性质等已知条件外推。用预先业已测试过的稳定或不稳定的容许程度，就可以避开相应的力学问题或实际破坏的概念。而且，本文中的“不稳定”是指“影响生产的特别不稳定”，可以用岩石力学理论和岩石性质的知识进行有效的推断，而在这种情况下，显然这种计算对实际和假定条件之间差异的敏感程度比按基本原理所作全新设计的情况要小得多。

包括增量计算在内，在整个设计分析中，凡是各种因素的可能变化之处，必须分辨清楚。例如：边坡角、边坡高度、构造特征的形态和频率、岩石的容重、采前应力条件、地下水位等因素都会随着地点、时间的不同而变化。在计算

中，准确地利用测定可变性的方法，在结构工程项目中证明是有效的。在岩石力学中应用这种相似的分析方法已经开始了。包括计算问题这个方面在内的优点之一是其答案用破坏概率（或不稳定概率）表示，而不用安全系数来表示，因此它能同财务分析结合起来。

如果能够用破坏概率进行估算，则对边坡设计中的经济评价是很有帮助的。在这种情况下，找出边坡岩石对延深和（或）加大露天矿边坡等开采反作用的控制的可能性，则可避免事故的发生，寻求包括开采费用和滑坡费用在内的最低费用标准则是可能的。尽管滑坡费用很难预算，但是可以根据试验而且还可计入破坏概率，用如下所示方程式估算：

$$C_t = 0.5HXC_o + 0.5HXC_tP_t \quad (2-1)$$

式中 C_t ——总费用；

H ——边坡高度；

X ——边坡水平投影；

C_o ——单位开采费用；

C_t ——是根据可能会破坏的边坡中棱形三角柱岩石与清除已崩落岩石所需费用之比而计算出的单位费用；

P_t ——为该种破坏的概率。

图2-2表示公式2-1的概念。

破坏概率受若干因素影响，边坡角和边坡高度显然是很重要的，边坡后面地下水位高度也是很重要的。这是在许多露天矿中春季常常发生滑坡的原因所在。破坏概率随着横距的增加，也即随着暴露到边坡应力条件下的岩石数量的增加而增加。有许多滑坡发生在边坡开采完后若干年，而有些情况下，后面的边帮尚未达到全高就已滑落，这说明了时间的

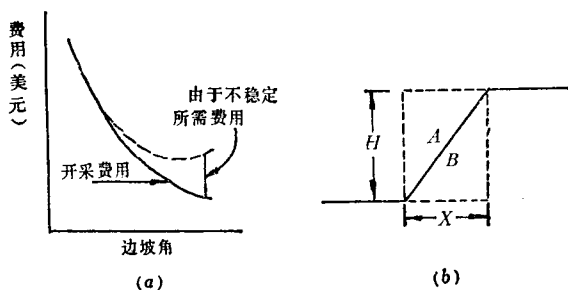


图 2-2 式2-1图象

(a) 开采总费用，它包括开采费与全部岩石滑坡清除费之和，而清除费用随着边坡角的增加而减少；(b) 估计所需要开采的棱形体 A，而在棱形体 B 中则要有部分岩石发生滑落

重要性。

另外，当几何尺寸和构造条件相同时，破坏概率可能受采前应力条件的影响。从理论上讲，这种影响是边坡底部压应力集中所致，而地层构造力会大大增加这种影响。因而，在这些边坡中，应力状态产生一些很难发觉的表面隆起和平行于表面的水平扩张，这会使地质构造开裂，很明显会助长这种不稳定性，非常容易发生许多台阶和大面积的滑坡。这种表面上的移动与采前水平应力成正比^[3]。

2-3 地下水

在地下水位高的场合，地下水的渗透对边坡的稳定性有严重的影响。这一影响主要是浮力的结果。由于水压力向上，作用在滑落面上的正压力减少，这又使摩擦阻力减少。

它的作用机理表示在图2-3中。在图2-3(a)中，引起方块滑动所需之力 P 是：

$$P = F_r = N \tan f = W \tan f \quad (2-2, a)$$

式中 f —— 表面摩擦角。

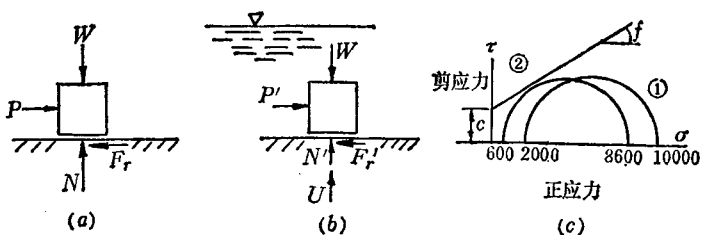


图 2-3 地下水对切向反力的影响

(a)和(b)浮力 U 把法向力由 N 减至 N' ，在破坏平面上，它将摩擦阻力由 F_r 减至 F'_r ；(c)相同的原理应用于内应力，莫尔圆②表示正应力从莫尔圆①减少的情况，这是由于作用于岩石颗粒之间孔隙水压的结果

假如将这块物体放于水中，如图2-3(b)所示，由于流体浮力 U 存在，反作用力 N 会从 W 减少到 $N' = W - U$ ，很明显由于这一减少，则最大的摩擦阻力减少至 F'_r 。换言之，引起滑坡所需要的力为 P' ，

$$P' = F'_r = N' \cdot \tan f = (W - U) \tan f \quad (2-2, b)$$

就各种应力而言图2-3(c)表明正应力减少，而剪应力保持不变。应力圆由①移到②，它更加接近破坏包络线。

2-4 平面剪切破坏

平面剪切是指沿地质弱面发生滑落的边坡破坏。在有些情况下，如图2-4(a)所示的比较简单情况将决定着边坡的稳定性。稳定性取决于弱面的倾斜角 b 、该平面上的内聚力 c 、平面之间的摩擦角 f 以及滑坡部分的重量 W ；而滑坡部分的重量 W 又取决于边坡角 i 、岩石密度 m 和边坡高度 H ；如果有地下水渗出，则边坡后面的地下水高度 D 也是一个很重要的因素。在评定平面剪切不稳定的可能性中所遇到的实际困难是具体标出发生滑坡的弱岩面位置，以及测定该