

现代工程岩土力学基础

于学馥 著



科学出版社

1 9 9 5

现代工程岩土力学基础

于学馥 著

科学出版社

1 9 9 5

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

本书全面、系统地总结了作者在采矿工程设计和施工中的科研成果和实际经验,是结合有关教学和科研实践写成的一本专著。在岩土力学众多的工程背景中,作者选择了采矿工程,运用自己近半个世纪从事采矿工程研究的丰富经验以及从中提升出的理论,深入、具体、独特地剖析了采矿工程中的各种力学问题。

本书最大的特点是较成功地将弹塑性力学的基本原理与岩土工程的实践相结合,提出了一些有价值的学术观点。

本书可供有关专业的大学生、研究生、教师以及广大从事采矿专业的工程技术人员阅读、参考。

现代工程岩土力学基础

于学馥 著

责任编辑 杨岭

科学出版社出版

北京东黄城根北街15号

邮政编码:100717

北京黄坎印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1995年2月第一版 开本:850×1168 1/32

1995年2月第一次印刷 印张:11 1/2

印数:1—940 字数:302000

ISBN 7-03-004299-9/O·746

定价:14.20元

目 录

前言

第一章 原岩体地应力	(1)
§1-1 概述	(1)
§1-2 地应力的工程分类	(1)
§1-3 地壳浅层地应力的变化规律	(4)
§1-4 地应力的影响因素	(12)
§1-5 岩土工程与我国构造应力场	(18)
§1-6 地应力的分析方法	(24)
第二章 工程岩土的基本力学性质	(27)
§2-1 概述	(27)
§2-2 工程岩土的基本力学性质	(28)
§2-3 工程岩土的力学属性判别问题	(35)
§2-4 结构面的基本力学性质	(37)
§2-5 岩土的非线性特征	(49)
§2-6 工程岩土的介质分类	(52)
第三章 岩土工程的线弹性分析	(55)
§3-1 概述	(55)
§3-2 线弹性理论平面变形问题基本方程	(56)
§3-3 围岩应力及变形计算	(61)
§3-4 轴变论及其工程意义	(70)
§3-5 岩土工程中的线弹性分析和有限元法	(89)
第四章 岩土工程中的弹塑性分析	(119)
§4-1 概述	(119)
§4-2 应力球张量和应力偏张量	(119)
§4-3 弹塑性问题基本理论	(129)
§4-4 弹-塑性模型	(141)
§4-5 弹塑性应力分析方法	(149)
§4-6 拉破坏的非线性分析	(162)

§4-7 应用简介	(170)
第五章 岩土工程的流变问题	(172)
§5-1 概述	(172)
§5-2 弹性及其模型	(178)
§5-3 粘性及其模型	(179)
§5-4 粘弹性及其模型	(181)
§5-5 理想塑性及其组合模型	(201)
§5-6 粘弹塑性模型	(204)
§5-7 一维流变模型的应用问题	(210)
§5-8 流变问题有限元分析	(213)
第六章 喷锚支护原理及其应用实例	(220)
§6-1 概述	(220)
§6-2 喷锚支护在金川矿的应用实例	(222)
§6-3 信息设计施工方法的应用	(232)
§6-4 围岩内部变形动态分析	(235)
§6-5 喷锚支护的基本力学问题	(237)
第七章 膨胀地压机理	(243)
§7-1 概述	(243)
§7-2 膨胀岩土的分类	(244)
§7-3 膨胀岩的胶结问题	(248)
§7-4 膨胀性指标与矿物成分鉴定	(250)
§7-5 膨胀岩土的力学效应	(257)
§7-6 膨胀地压的防治原理	(259)
第八章 采矿工艺过程力学效应动态分析法	(263)
§8-1 概述	(263)
§8-2 采矿工艺过程力学效应动态分析原理	(267)
§8-3 金川上向胶结充填法回采工艺过程动态分析算例	(272)
§8-4 上向胶结充填法的计算成果	(279)
§8-5 下向胶结充填法计算与理论分析	(287)
§8-6 充填作用机理的新认识	(294)
第九章 信息与反馈	(299)
§9-1 概述	(299)
§9-2 位移反分析	(301)

§9-3 金川反分析算例	(310)
第十章 不连续岩石的有限元分析	(326)
§10-1 概述	(326)
§10-2 模拟弱面的单元	(329)
§10-3 层状岩石及单元特性	(339)
§10-4 弱面岩石的非线性模型	(345)
§10-5 计算示例	(352)
参考文献	(356)

第一章 原岩体地应力

§1-1 概述

地应力是引起采矿和各种地下工程围岩和支护变形、破坏的根本作用力,是确定工程岩体力学属性的必要条件,也是对围岩进行稳定分析和定量计算的前提条件。10年来,作者一再强调矿山地应力的重要性^[18-20],因为我国很多岩土工程,特别是重要的矿山,如两淮、枣庄、新汶、黄县、弓长岭、抚顺、沈北、梅河口、唐山、北京、峰峰、大同、金川、天池、天府、南桐等矿山都牵扯到这个问题。

地应力是地壳本身存在的应力。这些应力在岩土工程开挖的影响下,长期处于增载、卸载状态,导致围岩变形、破坏。这是认识围岩稳定规律的出发点。

岩土在低应力作用下可表现为弹性,在高应力作用下,又会表现为塑性或粘性。对于某一工程或某一地段的力学属性,只有在具体掌握了该处地应力的条件下,才有可能认识到它。掌握和认识岩体的力学属性是正确选择力学方法并进行定量计算的基础。

外荷载条件是一切力学计算的前提条件。外荷载条件不同,计算的结果不同。采矿和地下工程围岩变形、破坏的根本作用力是地应力。所以说,地应力是对围岩进行稳定分析和定量计算的前提条件和基础。

这就是作者强调地应力的重要性,并建议矿山进行地应力测量的原因。

§1-2 地应力的工程分类

地应力是地壳本身存在的应力。地层内各点的应力称为原岩体地应力,它是未受开挖或其他岩土工程影响的原岩体应力,亦称原始应力。

引起地应力的原因是多种多样的。对地应力的分类,各家学说很多。作者在此不作评论,只从考虑工程稳定问题的需要出发,提出自己的地应力的工程分类。

人们认识地应力是近百年的事。瑞土地质学家海姆(Heim)通过观察大型越岭隧洞围岩的工作状态,首先提出地应力的概念。1905—1912年海姆假定岩体中有一个垂直应力和水平应力,认为垂直应力与上覆岩体重量有关,它等于 γH (γ 及 H 分别代表岩体容重和深度),并认为水平应力与垂直应力相等。

金尼克(Диник, А. Н.)在1925—1926年,根据弹性理论的分析,提出垂直应力等于 γH ,而水平应力等于 $\frac{\mu}{1-\mu} \gamma H$ 的理论,其中 μ 是岩土泊松比。

1915年瑞典人哈斯特(Hast, N.)首先在斯堪地纳维亚半岛开创了岩体中地应力的测量工作。接着,许多国家也先后开展了这项工作。经过实测证明,地层和岩体存在地应力是毫无疑问的,不过,至少深度在3000 m范围以内,海姆和金尼克的假说都没反映地应力状态的普遍规律。由于地应力的复杂性,目前在理论上还不能对它进行计算。但有一点是明确的,任意假设的地应力会给理论分析带来误谬的结论。

近30年实测与理论分析证明,地应力是一个具有相对稳定的非稳定应力场,即岩体的原始应力状态是空间与时间的函数。这是因为地球时时处于动力运动之中,它使地壳产生各种应力场。以我国地区而言,地球产生的应力场有以下两种。

(1) 全大陆性的应力场:板块边界受压造成的应力场,地幔热对流引起的应力场,地球内应力引起的应力场,重力引起的应力场,地球旋转引起的应力场等等。这些应力场在各地区都有不同的表现。

(2) 局部应力场:应力积累引起的应力场,岩浆侵入和地壳非均匀扩容引起的应力场,温度不均引起的应力场,水压梯度引起的应力场等。

地壳中所有的力学过程都发生在上述应力场的综合作用下。因此,各地区的应力场在时间上和空间上都有变化。

当前地应力还不能计算,只能通过实测获得。因此,就岩土工程问题分析而言,我们需要注意两种应力。

一、垂直应力

垂直于地壳水平面的应力称为垂直应力。它是地球运动中各种应力场中垂直应力分量的总和。板块移动、岩浆对流和侵入、扩容不均匀膨胀等也都可以引起垂直应力的变化。

二、水平应力

水平应力和垂直应力一样,也是地球运动中各种应力场中水平应力分量的总和。它比垂直应力分量更为复杂。但有下列几个应力需要岩土工程与采矿稳定问题研究者注意。

(1) 结构内应力。岩石是多种矿物组成的非均质性集合体,它在形成的过程中,特别在高温、高压条件下岩浆结晶时,由于矿物颗粒间膨胀系数不同产生非均匀性变形,使晶面沿着容易滑移的非连续面相互错动而产生应力,也由于晶体内部及颗粒边界的畸变,使岩体内部产生应力。这些应力在无外力条件下处于自我平衡状态。无论有无外力,它始终存在于岩石之中,故称为结构内应力。

(2) 古构造应力。地层经历过地质史上的各种地质构造运动的作用,所以具有断层、褶曲、层间错动等构造现象。因此,地层内部存在着构造上的残余应力,称为古构造应力或构造残余应力。有人把结构内应力和古构造应力合并起来称为封闭应力。

(3) 新构造应力。某些地层正在经受着新的构造运动的作用,在此运动中引起地层升降、褶曲和断裂的应力,称为新构造应力。一般来说,新构造应力是引起当今构造地震应力的应力源。在这些地区及其附近,地应力是较大的,常常给岩土工程和采矿带来施工上的困难。

地壳是个流变体,它以 $10^{-4} \sim 10^{-6} \text{ m m/s}$ 的速率缓慢地运动着,并经受连续的应力松弛,正是这种运动导致应力场不断发生变化,并使应力积累在地壳较硬的部位。这种应力积累到一定程度便会突然释放,造成地震。

古构造应力、新构造应力和岩石生成过程中形成的结构内应力,从工程角度来看,可以归为一类,称为构造应力。虽然直到现在对它们都还不能进行计算,但是在工程设计与施工中必须加以考虑。

§1-3 地壳浅层地应力的变化规律^[3-5]

由于引起地应力的原因是多种多样的,以及地质、地形、构造和岩体物理力学性质等方面的影响,所以直到现在各种应力分量都不能由理论计算获得,只能通过实测获得。虽然垂直应力中的重力应力是可计算的,但计算出来的数值也是假定出来的,具有较大的盲目性。至于水平应力则不能通过理论计算获得,只有通过实测和地质力学、现场分析等综合方法获得的数据,才具有使用价值。特别在构造应力地区,包括地质构造带和地震区,更需要这样。也由于上述原因,使得我们在认识原岩体地应力状态及其变化规律方面,遇到了很大困难。不过从目前现有的实测资料来看,3000m以内地壳浅层地应力的变化规律,大致可归纳如下几点。但是也应当指出,随着实测资料的不断增加,人们对地应力的认识,将会逐步加深。

一、地应力场是个非稳定应力场

岩体中的原始应力场绝大部份是以水平应力为主的三向不等压的空间应力场。三个主应力的大小和方向是随着空间和时间而变化的,因此三个主应力是非稳定的。

地应力随空间变化。就范围而言,小到一個矿山或水利枢纽,都可以发现它的大小和轴向从一个地段到另一个地段的变化。一般它的偏差系数可以达到 25% — 50%。但就整体而言,地应力的变

化是不大的。兹以我国华北地区为例,地应力场的主导方向为北西西到近于东西向的压应力。具体地区应力的变化如表 1.3 - 1 所示。

表 1.3-1 唐山附近地区地震前后的地应力变化状况

地 点	测量时间 年 月	最大主应力方向		水平应力(MPa)		最大剪应力(MPa) $\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}$
		地震前	地震后	σ_1	σ_2	
唐山凤凰山	1976.10	近东西向	N47° W	2.5	1.7	0.40
三河弧山	1976.10		N69° W	2.1	0.5	0.80
怀柔坟头村	1976.11		N83° W	4.1	1.1	1.50
顺义吴雄寺	1971.6	N75° W		3.1	1.8	0.65
顺义吴雄寺	1973.1	N73° W		2.6	0.4	1.10
顺义吴雄寺	1976.9			3.6	1.7	0.95
顺义吴雄寺	1977.7		N83° W	2.7	2.1	0.30
滦县一号孔	1976.8		N75° W	5.8	3.0	1.40
滦县二号孔	1976.9		N84° W	6.6	3.2	1.70
			N89° W			

根据兰州地震研究所崔中元和何秀琴 70—79 年对地应力的研究,金川地区正处于应力积累阶段,应变积累速率约为 10^{-7} — 10^{-6} m / 年。甘肃六盘山的应变速率可达 $n \times 10^{-5}$ m / 年(n 是正整数),附加应力在 10 年中的变化为 1.0—2.0MPa,有时也观测到附加应力在数天之内的变化可达到 0.5MPa^[15, 16]。

地应力的大小和轴向在地震活动区的变化是相当大的。从 1976 年 7 月 28 日唐山地震前后顺义吴雄寺测量到的地应力的变化看出,该测点经过一个应力积累到释放的过程,从震前的 1971 年到 1973 年, $\tau_{\max}$ 由 0.65MPa 积累到 1.10MPa,从震后的 1976 年 9 月到 1977 年 7 月, $\tau_{\max}$ 由 0.95MPa 释放到 0.30MPa。主应力的方向变化如表 1.3 - 1 所示,并且都在主震后一年左右恢复到震前状态。

根据对喀尔巴阡山和高加索等地的测量发现,每隔 6—12 年应力轴方向有较大的变化^[8]。哈斯特在中非、格陵兰和斯匹兹卑尔根的古老的花岗岩地区发现,地壳上部的水平应力场已改变了方向,应力至少有过三次在零值与峰值之间的变化,而且至今仍在变化。但是,也有的地方应力状态极为稳定,如瑞典北部的梅尔贝格特矿区,现今应力场与 20 亿年前的应力方向完全相同^[9]。我国甘肃六盘山主应力方向在两三年内有 20° — 30° 的变化($N26^{\circ}$ — $65^{\circ}E$),特别是当区域地块活动剧烈的时期(如 1976 年)变化更大,但是很少有相差 90° 的情况。

二、实测的垂直应力(σ_v)基本等于上覆岩土产生的压应力(γH)

H. K. 布林在研究了全世界有关垂直应力 γH 的资料后证明,在深度为 25—2700m 范围内, σ_v 呈线性增长,大致相当于按平均容重 $\gamma = 2.7g/cm^3$ 计算出来的压应力 γH ,见图 1.3-1。在这种情况下,除少数(特别在地壳浅层)偏离较远外,一般分散度不大于 5%。但是,从我国资料来看, $\sigma_v/\gamma H = 0.8$ — 1.2 (一般以此数据作为大体相等的指标)的仅有 5%, $\sigma_v/\gamma H < 0.8$ 的占 16%,而 $\sigma_v/\gamma H > 1.2$ 的占 79%,其中个别达到 20。这些资料大都是在 200m 以内测量得到的,最深的只有 500m。从图 1.3-1 可见,我国的实测资料的分散程度并不特别突出^[4]。

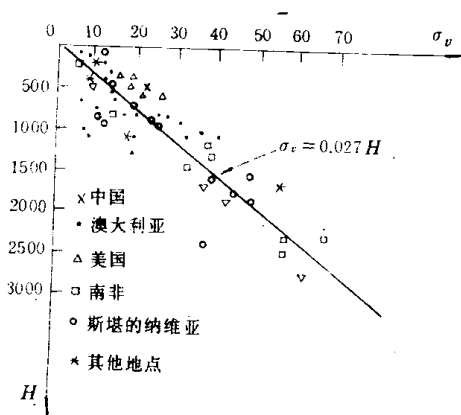


图 1.3-1 σ_v 与 H 的关系

根据 A.B.裴伟整理的前苏联资料^[8] 表明, $\sigma_v/\gamma H < 0.8$ 的占 4%, $=0.8-1.2$ 的占 23%, >1.2 的占 73%, 其中个别最大的达到 37。这些统计的最大深度为 915m, 统计的结果接近于我国统计资料。

三、水平应力 σ_h 普遍大于垂直应力 σ_v

根据国内外实测资料统计, σ_h 多数大于 σ_v , 并且最大水平应力 $\sigma_{h,1}$ 与实测垂直应力 σ_v 的比值, 即侧压系数 λ , 一般为 0.5—5.5, 大部分在 0.8—1.2 之间, 最大值有的达到了 30 或更大。

目前也常惯用二个水平应力的平均值 $\sigma_{h,av}$ 与垂直应力 σ_v 的比值来表示侧压系数, 此值一般为 0.5—5.0, 大多数为 0.8—1.5。我国实测资料表明, 该值在 0.8—3.0 之间, 而大部分为 0.8—1.2 之间, 参见表 1.3-2—1.3-4。

§ 表1.3-2 部份国家的侧压系数情况^[4]

国家名称	$\sigma_{h,av}/\sigma_v$ (%)			$\sigma_{h,av}/\sigma_v$
	<0.8	0.8-1.2	>1.2	
中 国	32	40	28	2.09
澳大利亚	0	22	78	2.95
加 拿 大	0	0	100	2.56
美 国	18	41	41	3.29
挪 威	17	17	66	5.56
瑞 典	0	0	100	4.99
南 非	41	24	35	2.50
前 苏 联	51	29	20	4.30
其他地区	37.5	37.5	25	1.96

这些资料说明: 与重力应力场情况不同, 实测得到的 σ_v 多数为最小主应力, 少数为最大主应力或中间主应力。例如, 斯堪地纳

维亚半岛的前寒武纪岩体,北美地台的加拿大地盾,前苏联的希宾地块等地,基本上都是最小主应力。在挪威矿山岩体中测到的 σ_v ,基本为最大主应力。此外,由于侧向侵蚀的卸载作用,在孤山体部分,以及河谷的谷坡附近处, σ_v 常为最大主应力。

四、平均水平应力($\sigma_{h.av}$)与垂直应力(σ_v)的比值(λ)与深度的关系

$\sigma_{h.av}/\sigma_v$ 的比值 λ 也是表征地区地应力场特征的指标。该值是随着深度增加而增加的。但在不同地区,也有差异,有人用下列公式表示该值的变化范围(见图 1.3-2^[11]):

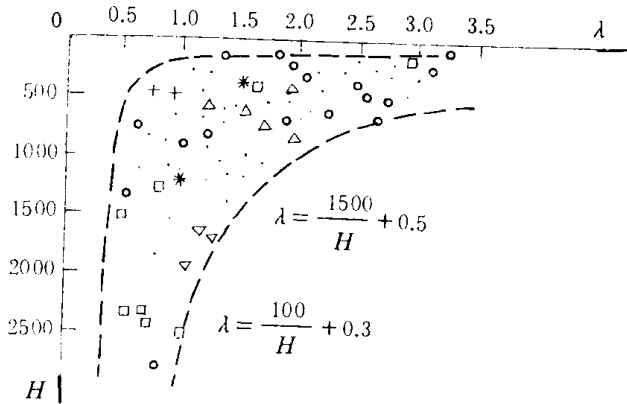


图 1.3-2 侧压系数与深度的关系

$$\frac{100}{H} + 0.30 \leq \lambda \leq \frac{1500}{H} + 0.5 \quad (1.3-1)$$

当 $H=500$ m 时, $0.5 \leq \lambda \leq 3.5$; 当 $H=2000$ m 时, $0.35 \leq \lambda \leq 1.25$ 。

从已有的资料来看也是这样,在深度不大的情况下(例如小于 1000 m), λ 值很分散,并且数值较大;随着深度的增加, λ 值的分散度变小,并且向 1 的附近集中。这相应于前述的海姆静水应力状态。

表 1.3-3 我国水平应力与垂直应力实测资料^[5]

测量地点	岩 性	深度 (m)	水平应力 σ_h (MPa)	垂直应力 σ_v (MPa)	σ_h / σ_v
511 工程二号地下厂房	原状厚层砂层	98	3.86	2.57	1.50
映秀湾地下厂房	花岗及花岗闪长岩	200	12.36	9.92	1.25
西藏羊卓雍湖电站厂房	泥质页岩和砂岩	-	0.53	1.55	0.34
二滩电站厂房	花岗岩	100	9.00	21.6	0.41
515 工程	花岗岩	50-60	12.00	40.0	0.30
三峡 某某坝区	薄层中厚层微结晶 泥质条带	128	15.75	6.93	2.30
三峡 某某坝区	龙洞灰岩	100	8.98	4.38	2.05
太平坝二号洞	黄陵花岗岩 - 闪长岩		20.50	10.7	1.98
白山工程	混合岩	60	45.6	17.8	2.50
以礼河三级电站	破碎玄武岩	60	1.98	2.22	0.89
以礼河三级电站	火山角砾岩	60	0.82	0.95	0.86
以礼河三级电站	玄武岩	175	1.98	2.38	0.87
以礼河三级电站	火山角砾岩	220	8.87	7.97	1.12
西洱河一级电站	眼球状片麻岩及 石英云母 片岩夹黑云母眼 球片麻岩	60	18.13	6.67	1.30
云南第四电厂	石灰岩	0-70	1.7-2.40	1.28-1.46	1.36

表1.3-4 金川矿区地应力测量结果一览表^[10]

时间 (年)	地 点	岩 性	深 度 (m)	最大主应力 及方向 (MPa)	中间主应力 及方向 (MPa)	最小主应力 及方向 (MPa)
1977	二矿区东部 地表十八公里处	大理岩	8-20	2.4 N 27° W		2.3
1978	同 上	大理岩	11-44	4.2 N 20° E		3.5
1975	二矿东主井 1350 中段 测点	大理岩	375	19.8 N 3° E		10.8
1976	二矿东副井 1350 中段 测点	大理岩	460	50.0 N 13° E 倾角 6° 南东倾	33.4 N 76° E 倾角 6° 北东倾	28.2 S 63° E 倾角 81° 北西倾
1977	龙首矿1460 中段12 行穿 脉测点	富矿体	240	34.4 N 42° E 倾角 39° 北西倾	21.1 N 48° E 近水平	2.6 S 41° E 倾角 51° 南东倾
1977	二矿1250 中 段38.5 行沿 脉巷道测点	特富矿体	480	32.0 N 32° E 倾角 6° 西南倾	21.4 N 43° E 倾角 67° 西北倾	20.6 N 60° E 倾角 22° 南东倾

五、两个水平应力(σ_{hx} 与 σ_{hy})的关系

一般来说不论是大到一个地区还是小到一个工区, σ_{hx} 和 σ_{hy} 的大小和方向都有一定变化。一般认为, σ_{hy}/σ_{hx} 为 0.2—0.8, 大多数为 0.4—0.7。以我国华北地区为例, σ_{hy}/σ_{hx} 为 0.19—0.27 的占 17%, 0.43—0.64 的占 61%, 0.66—0.78 的占 22%。

作为比较, 表 1.3-5 列出了我国与欧美一些国家在这方面的部分统计数据, 详见文献[4—6]。

当然, 两个水平应力也有显示 $\sigma_{hx} = \sigma_{hy}$ 的情况, 这主要在构造简单、层理平缓的地区。华北地区某一方向的水平应力显示较大, 其原因可能是与高地震活动影响有关。

六、应力轴与水平面的相对关系

地应力的三个主应力轴一般与水平面有一定夹角。根据这个关系, 通常把地应力分为水平应力场和非水平应力场两类。

水平应力场的特点是两个主应力与水平面平行或与水平面的夹角小于或等于 30° , 另一个主应力轴接近于垂直平面, 或与水平面的夹角大于或等于 70° 。

非水平应力场的特点是一个主应力轴与水平面夹角约为 45° , 另外两个主应力轴与水平面夹角为 0° — 45° 。

实测证明, 最大水平应力的方向与地质构造的关系是复杂的, 有的地区最大主应力方向与构造线垂直, 而有的却平行于构造线方向。但总的来说, 最大水平应力的方向与地质史上所形成的褶皱及断裂走向之间, 无确定的方向关系。一般来说, 岩体在不同时代的应力状态是很不相同的。现代岩体中最大水平应力方向, 主要取决于现代构造应力场, 它和地质史上曾经出现过的应力场之间, 并不存在必然的联系。只有在现代应力场继承先前应力场而发展, 或与地史上某一次构造应力场的方向相偶合时, 现代水平应力的方向才可能与相应的地质构造要素之间发生关系。因此, 在需要判断当前岩体中水平应力方向时, 应根据地应力实测资料、弹性波传播速度的各向异性、地下围岩变形破坏特点, 以及地质力学