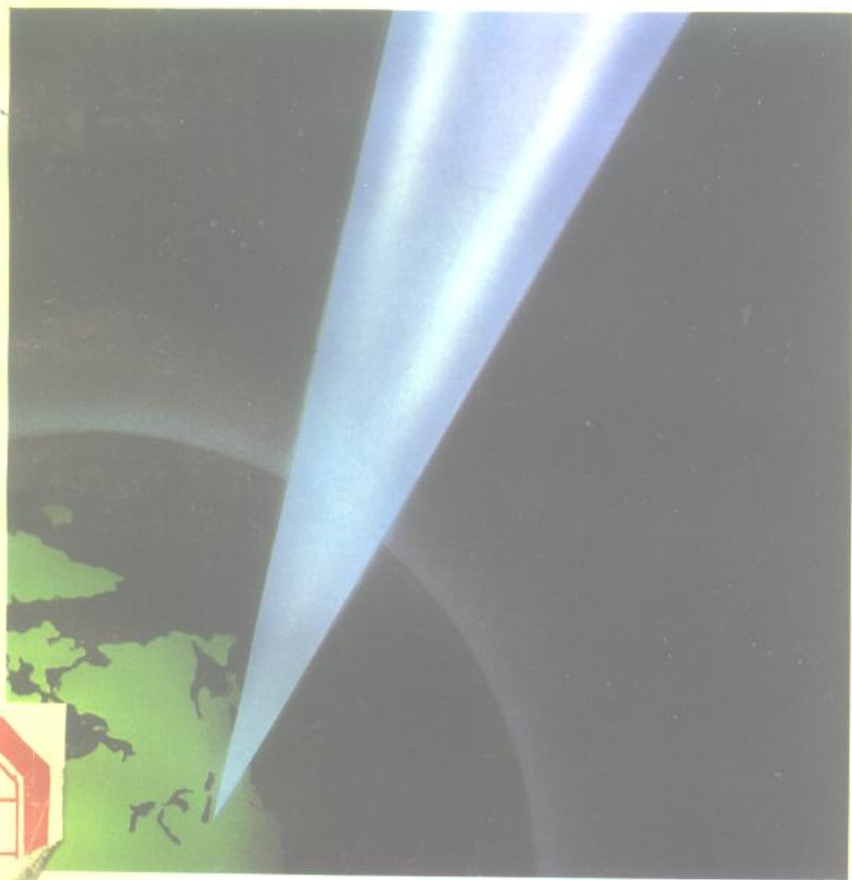


地应力测量 原理和技术

蔡美峰 乔 兰 李华斌 著



科学出版社

TU452
C03

~~427323~~
427930

地应力测量原理和技术

蔡美峰 乔 兰 李华斌 著



00427930

中 学 出 版 社

1995

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

本书对地应力的成因、一般分布规律以及人类对地应力的认识过程作了简要介绍。对地应力测量的基本原理和方法,已取得的成果及发展现状作了系统的论述和评价。特别对目前国内外应用最广泛的应力解除法进行了全面的介绍,并在作者长期理论研究、实验室试验和现场实测结果的基础上,提出了大幅度提高地应力解除测量精度的各种技术和措施。

DV21/10



地应力测量原理和技术

蔡美峰 乔 兰 李华斌 著

责任编辑 李成香

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1995年11月第 一 版 开本: 850×1168 1/32

1995年11月第一次印刷 印张: 7 5/8

印数: 1—700

字数: 194 000

ISBN 7-03-004763-X/O · 811

定价: 16.00 元

前 言

地应力是引起采矿、水利水电、土木建筑、铁道、公路、军事和其他各种地下或露天岩土开挖工程变形和破坏的根本作用力,是确定工程岩体力学属性,进行围岩稳定性分析,实现岩土工程开挖设计和决策科学化的必要前提。

传统的采矿及其他岩土工程的开挖设计和施工是根据经验来进行的。当开挖活动是在小规模范围内和接近地表的深度上进行的时候,经验类比的方法往往是有效的。但是随着开挖规模的不断扩大和不断向深部发展,特别是数百万吨级的大型地下矿山、大型地下电站、大坝、大断面地下隧道、地下峒室以及高陡边坡的出现,经验类比法已越来越失去其作用。根据经验进行开挖施工往往造成各种露天或地下工程的失稳、坍塌或破坏,使采矿或其他各种地下作业无法进行,并经常导致严重的工程事故,造成可怕的人员伤亡和国家及集体财产的巨大损失。

为了对各种岩土工程进行科学合理的开挖设计和施工,就必须对影响工程稳定性的各种因素进行充分调查。只有详细了解了这些工程影响因素,并通过数值计算和分析,才能作出既经济又安全实用的工程设计。在诸多的影响岩体开挖工程稳定性的因素中,地应力状态是最重要最根本的因素之一。如对矿山设计来说,只有掌握了具体工程区域的地应力条件,才能合理确定矿山总体布置,选取适当的采矿方法,确定巷道和采场的最佳断面形状、断面尺寸、开挖步骤、支护形式、支护结构参数、支护时间等,从而在保证围岩稳定性的前提下,最大限度地增加矿石产量,提高矿山经济效益。如根据弹性力学理论,巷道和采场的最佳形状主要由其断面内的二个主应力的比值来决定,为了减少巷道和采场周边的应力集中现象,它们最理想的断面形状应是一个椭圆,而这个椭圆在水平

和垂直方向的两个半轴的长度之比应与该断面内水平主应力和垂直主应力之比相等。在此情况下,巷道和采场周边将处于均匀等压应力状态。这是一种最稳定的受力状态。同样,在确定巷道和采场走向时,也应考虑地应力的状态,最理想的走向是与最大主应力方向相平行。当然,实际工程中的采场和巷道走向和断面形状还要综合考虑工程需要、经济性和其它条件来决定。

由于各种岩土开挖体的复杂性和形状多样性,利用理论解析解的方法进行工程稳定性的分析和计算几乎是不可能的。但是,近20年来大型电子计算机的应用和有限元、边界元、离散元等各种数值分析方法的不断发展,使岩土工程迅速接近其他工程领域,成为一门可以进行定量设计计算和分析的工程科学。岩土工程的定量设计计算比其它工程要复杂得多和困难得多,其根本点在于工程地质条件、岩体性质的不确定性以及岩石材料受力后的应力状态具有加载途径性。岩土开挖的力学效应不仅取决于当时的应力状态,也取决于历史上的全部应力状态。由于采矿和许多岩土工程是一个多步骤的多次开挖过程,前面的每次开挖都对后期的开挖产生影响。施工步骤不同,开挖顺序不同,都有各自不同的最终力学效应,即最终不同的稳定性状态。所以只有采用系统工程、数理统计理论,通过大量的计算和分析,比较各种不同开挖和支护方法、过程、步骤、顺序下的应力和应变动态变化过程,采用优化设计的方法,才能确定最经济合理的开挖设计方案。所有的计算和分析都必须在已知地应力的前提下进行。如果对工程区域的实际原始应力状态一无所知,那么任何计算和分析都将失去其应有的真实性和实用价值。

另外,地应力状态对地震预报、区域地壳稳定性评价、油田油井的稳定性、核废料储存、岩爆、煤和瓦斯突出的研究以及地球动力学的研究等也具有重要意义。

人们认识地应力还只是近百年来事。1912年瑞士地质学家海姆(A. Heim)在大型越岭隧道的施工过程中,通过观察和分析,首次提出了地应力的概念^[1],并假定地应力是一种静水应力状态,

即地壳中任意一点的应力在各个方向上均相等,且等于单位面积上覆岩层的重量,即

$$\sigma_h = \sigma_v = \gamma H$$

式中, σ_h 为水平应力; σ_v 为垂直应力; γ 为上覆岩层容重; H 为深度.

1926年,苏联学者金尼克(A. H. Gennik)修正了海姆的静水压力假设,认为地壳中各点的垂直应力等于上覆岩层的重量,而侧向应力(水平应力)是泊松效应的结果,其值应为 γH 乘以一个修正系数. 他根据弹性力学理论,认为这个系数等于 $\frac{\nu}{1-\nu}$, 即

$$\sigma_v = \gamma H$$

$$\sigma_h = \frac{\nu}{1-\nu} \gamma H$$

式中, ν 为上覆岩层的泊松比.

同期的其他一些人主要关心的也是如何用一些数学公式来定量地计算地应力的,并且也都认为地应力只与重力有关,即以垂直应力为主. 他们的不同点只在于侧压系数的不同. 然而,许多地质现象,如断裂、褶皱等均表明地壳中水平应力的存在. 早在本世纪20年代,我国地质学家李四光就指出:“在构造应力的作用仅影响地壳上层一定厚度的情况下,水平应力分量的重要性远远超过垂直应力分量.”^[2]

50年代,哈斯特(N. Hast)首先在斯堪的纳维亚半岛进行了地应力测量的工作,发现存在于地壳上部的最大主应力几乎处处是水平或接近水平的,而且最大水平主应力一般为垂直应力的1—2倍,甚至更多. 在某些地表处,测得的最大水平应力高达7MPa,这就从根本上动摇了地应力是静水压力的理论和以垂直应力为主的观点^[3].

后来的进一步研究表明,重力作用和构造运动是引起地应力的主要原因,其中尤以水平方向的构造运动对地应力的形成影响最大. 当前的应力状态主要由最近一次的构造运动所控制,但也与历史上的构造运动有关. 由于亿万年来,地球经历了无数次大大小

小的构造运动,各次构造运动的应力场也经过多次的叠加、牵引和改造.另外,地应力场还受到其他多种因素的影响,因而造成了地应力状态的复杂性和多变性.即使在同一矿区,不同点的地应力状态也可能是很不相同的.因此,地应力的大小和方向不可能通过数学计算或模型分析的方法来获得.要了解一个地区的地应力状态,唯一的方法就是进行地应力测量.

目 录

前言	iii
第一章 地应力的成因及一般分布规律	1
1.1 地应力的成因	1
1.2 地应力分布的一些基本规律	3
第二章 地应力测量的一般概况	13
2.1 地应力测量的基本原则和方法	13
2.2 地应力测量技术的发展和概况	16
第三章 直接测量法	28
3.1 扁千斤顶法	28
3.2 刚性包体应力计法	32
3.3 水压致裂法	38
3.4 声发射法	47
第四章 间接测量法	51
4.1 套孔应力解除法	51
4.2 局部应力解除法	53
4.3 松弛应变测量法	59
4.4 地球物理探测法	64
第五章 应力解除法的主要测量技术和计算原理	68
5.1 孔径变形法	68
5.2 孔底应变法	76
5.3 孔壁应变法	79

5.4	空心包体应变法	85
5.5	实心包体应变法	90
第六章	应力解除测量技术和仪器在各种岩石条件下的试验和研究	95
6.1	试验方法	95
6.2	美国矿业局(USBM)孔径变形计试验结果及其评价	102
6.3	南非科学和工业研究委员会(CSIR)三轴孔壁应变计试验结果及其评价	117
6.4	澳大利亚科学和工业研究组织(CSIRO)空心包体应变计试验结果及其评价	130
6.5	澳大利亚新南威尔士大学(UNSW)实心包体应变计试验结果及其评价	150
6.6	四种测量仪器工作性能的综合比较和分析	165
第七章	影响应力解除法测量精度的主要问题及其改进技术	170
7.1	环境温度的影响及其完全温度补偿技术	170
7.2	岩石非线性的影响及其正确的岩石弹性模量、泊松比测定方法	178
7.3	岩石不连续性、不均质性和各向异性的影响及其修正方法	181
7.4	减少应变测量和记录系统误差的方法	188
第八章	应力解除法在新城金矿地应力场测量中的应用	192
8.1	矿山概况和地应力测量总体安排	192
8.2	测量和试验结果及其分析	196
8.3	矿区地应力分布规律及其与地质构造的关系	210
参考文献		218

第一章 地应力的成因及一般分布规律

1.1 地应力的成因

地应力是存在于地层中的未受工程扰动的天然应力,也称岩体初始应力、绝对应力或原岩应力。

产生地应力的原因是十分复杂的,也是至今尚不十分清楚的问题。30多年来的实测和理论分析表明,地应力形成主要与地球的各种动力运动过程有关,其中包括:板块边界受压、地幔热对流、地球内应力、地心引力、地球旋转、岩浆侵入和地壳非均匀扩容等。另外,温度不均、水压梯度、地表剥蚀或其它物理化学变化等也可引起相应的应力场。其中,构造应力场和重力应力场是现今地应力场的主要组成部分。

1. 大陆板块边界受压引起的应力场

中国大陆板块受到外部两块板块的推挤,即印度板块和太平洋板块的推挤,推挤速度为每年数厘米。同时受到了西伯利亚板块和菲律宾板块的约束。在这样的边界条件下,板块发生变形,产生水平受压应力场,其主应力迹线如图 1-1 所示^[4]。印度板块和太平洋板块的移动促成了中国山脉的形成,控制了我国地震的分布。

2. 地幔热对流引起的应力场

由硅镁质组成的地幔因温度很高,具有可塑性,并可以上下对流和蠕动。当地幔深处的上升流到达地幔顶部时,就分为二股方向相反的平流。经一定流程直到与另一对流圈的反向平流相遇,一起转为下降流,回到地球深处,形成一个封闭的循环体系。地幔热对流引起地壳下面的水平切向应力,在亚洲形成由孟加拉湾一直延伸到贝加尔湖的最低重力槽,它是一个有拉伸特点的带状区。我国从西昌、渡口到昆明的裂谷正位于这一地区。该裂谷区有一个以

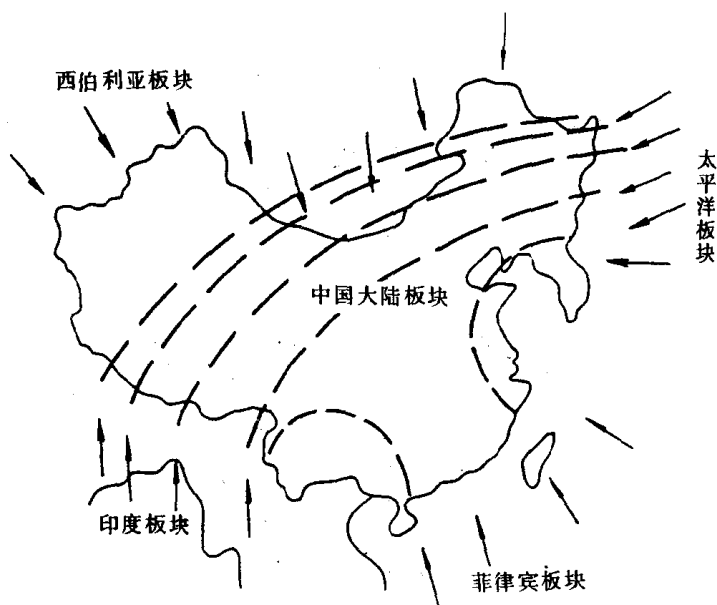


图 1-1 中国板块主应力迹线图

西藏中部为中心的上升流的大对流环,在华北-山西地堑有一个下降流.由于地幔物质的下降,引起很大的水平挤压应力.

3. 由地心引力引起的应力场

由地心引力引起的应力场称为重力应力场.重力应力场是各种应力场中唯一能够计算的应力场.地壳中任一点的自重应力等于单位面积的上覆岩层的重量,即

$$\sigma_G = \gamma H$$

式中 γ 为上覆岩层的容重, H 为深度.

重力应力为垂直方向应力,它是地壳中所有各点垂直应力的主要组成部分.但是垂直应力一般并不完全等于自重应力,因为板块移动,岩浆对流和侵入、岩体非均匀扩容、温度不均和水压梯度均会引起垂直方向应力变化.

4. 岩浆侵入引起的应力场

岩浆侵入挤压、冷凝收缩和成岩,均在周围地层中产生相应的应力场,其过程也是相当复杂的.熔融状态的岩浆处于静水压力状

态,对其周围施加的是各个方向相等的均匀压力.但是炽热的岩浆侵入后即逐渐冷凝收缩,并从接触介面处逐渐向内部发展.不同的热膨胀系数及热力学过程会使侵入岩浆自身及其周围岩体应力产生复杂的变化过程.

与上述三种应力场不同,由岩浆侵入引起的应力场是一种局部应力场.

5. 地温梯度引起的应力场

地层的温度随着深度增加而升高,一般温度梯度为 $\alpha = 3^{\circ}\text{C}/100\text{m}$. 由于温度梯度引起地层中不同深度不相同的膨胀,从而引起地层中的压应力,其值可达相同深度自重应力的数分之一.

另外,岩体局部寒热不均,产生收缩和膨胀,也会导致岩体内部产生局部应力场.

6. 地表剥蚀产生的应力场

地壳上升部分岩体因为风化、侵蚀和雨水冲刷搬运而产生剥蚀作用.剥蚀后,由于岩体内的颗粒结构的变化和应力松弛赶不上这种变化,导致岩体内仍然存在着比由地层厚度所引起的自重应力还要大得多的水平应力值.因此,在某些地区,大的水平应力除与构造应力有关外,还和地表剥蚀有关.

1.2 地应力分布的一些基本规律

通过理论研究,地质调查和大量的地应力测量资料的分析研究,已初步认识到浅部地壳应力分布的一些基本规律^[5,6].

1. 地应力是一个具有相对稳定性的非稳定应力场,它是时间和空间的函数.

地应力在绝大部分地区是以水平应力为主的三向不等压应力场.三个主应力的大小和方向是随着空间和时间而变化的,因而它是个非稳定的应力场.

地应力在空间上的变化,从小范围来看,其变化是很明显的,从一个矿山到另一个矿山,从某一点到相距数十米外的另一点,地

应力的方向和大小也是不同的。但就某个地区整体而言,地应力的变化是不大的。如我国的华北地区,地应力场的主导方向为北西到近于东西的主压应力。

在某些地震活动活跃的地区,地应力的方向和大小随时间的变化是很明显的。在地震前,处于应力积累阶段,应力值不断升高,而地震时使集中的应力得到释放,应力值突然大幅度下降。主应力方向在地震发生时会发生明显改变,在地震后一段时间又会恢复到震前的状态。如1976年唐山地震后,在唐山凤凰山测得的最大主应力方向为北 47° 西,与区域应力场的最大主应力方向有较大偏差。1978年,在同一地点测量,其最大主应力方向变为近东西向(北 89° 西),与区域应力场最大主应力方向相一致。邢台地震区也有类似情况。前苏联的喀尔巴阡山、高加索等地,发现主应力方向每隔6—12年就有一次较大变化。我国甘肃六盘山主应力方向在三年内有 20° — 30° 的改变。而瑞典北部的梅尔格特矿区,发现现今应力场方向与20亿年前应力场方向完全相同。

2. 实测垂直应力基本等于上覆岩层的重量

对全世界实测垂直应力 σ_v 的统计资料的分析表明,在深度为25—2700m的范围内, σ_v 呈线性增长,大致相当于按平均容重 γ 等于 27kN/m^3 计算出来的重力 γH 。但在某些地区的测量结果有一定幅度的偏差。如我国 $\sigma_v/\gamma H=0.8-1.2$ 的仅占5%, $\sigma_v/\gamma H<0.8$ 的占16%,而 $\sigma_v/\gamma H>1.2$ 的占79%。前苏联测量资料表明, $\sigma_v/\gamma H<0.8$ 的占4%, $\sigma_v/\gamma H=0.8-1.2$ 的占23%, $\sigma_v/\gamma H>1.2$ 的占73%。上述偏差除有一部分可能归结于测量误差外,板块移动、岩浆对流和侵入、扩容、不均匀膨胀等也都可引起垂直应力的异常。

值得注意的是,在世界多数地区并不存在真正的垂直应力即没有一个主应力的方向完全与地表垂直。但在绝大多数测点都发现确有一个主应力接近于垂直方向,其与垂直方向的偏差不大于 20° 。这一事实说明,地应力的垂直分量主要受重力的控制,但也受到其它因素的影响。图1-2是霍克(E. Hoek)和布朗(E. T. Brown)

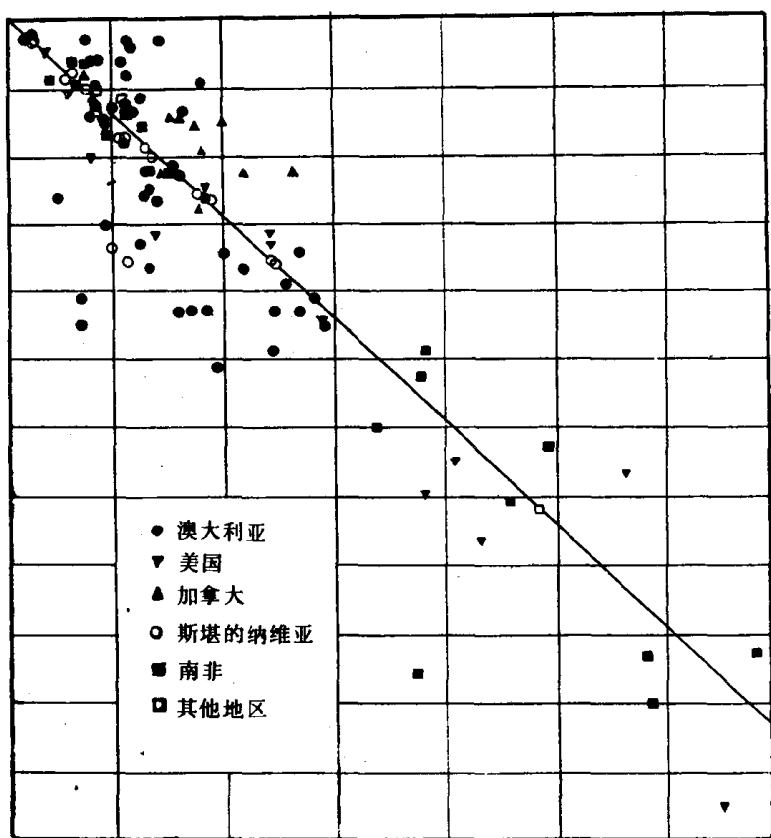


图 1-2 世界各国垂直应力 σ_v 随深度 H 的变化规律图

总结出的世界各国 σ_v 随深度 H 变化的规律^[7]。布朗和温泽 (C. R. Windsor) 总结的澳大利亚大陆 σ_v 与 H 关系的更详细资料亦示于图 1-3^[8]。

3. 水平应力普遍大于垂直应力

实测资料表明,在绝大多数(几乎所有)地区均有两个主应力位于水平或接近水平的平面内,其与水平面的夹角一般不大于 30° 。最大水平主应力 $\sigma_{h,max}$ 普遍大于垂直应力 σ_v ; $\sigma_{h,max}$ 与 σ_v 之比值,一般为 $0.5-5.5$,在很多情况下比值大于 2 ,参见表 1-1^[5]。如果将最大水平主应力与最小主应力的平均值:

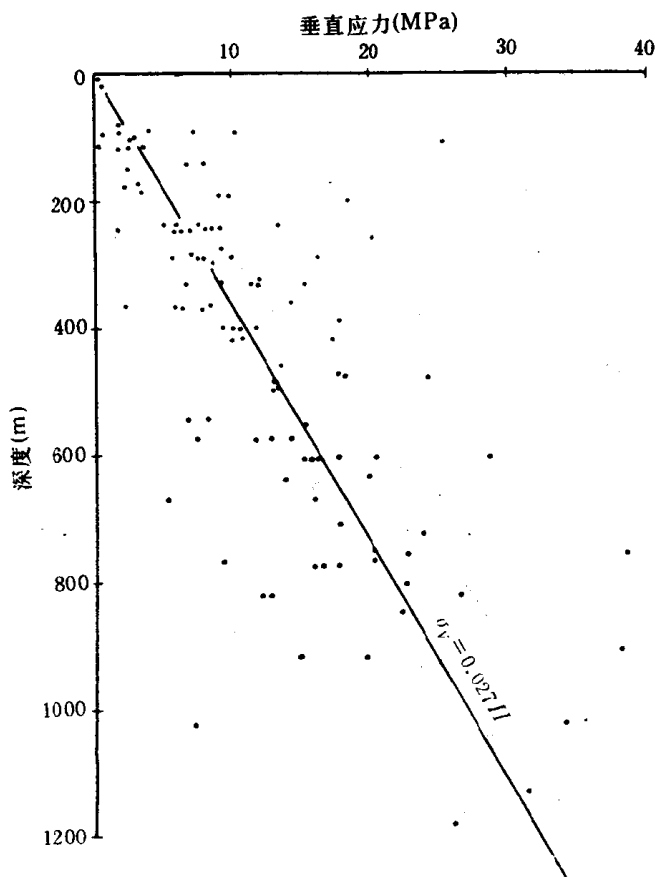


图 1-3 澳大利亚垂直应力 σ_v 随深度 H 的变化规律图

$$\sigma_{h,av} = \frac{\sigma_{h,max} + \sigma_{h,min}}{2}$$

与 σ_v 相比,总结目前全世界地应力实测的结果,得出 $\sigma_{h,av}/\sigma_v$ 之值一般为 0.5—5.0,大多数为 0.8—1.5(参见表 1-1),这说明在浅层地壳中平均水平应力也普遍大于垂直应力.垂直应力在多数情况下为最小主应力,在少数情况下为中间主应力,只在个别情况下为最大主应力.这再次说明,水平方向的构造运动如板块移动、碰撞对地壳浅层地应力的形成起控制作用.

4. 平均水平应力与垂直应力的比值随深度增加而减小,但在

表 1-1 世界各国平均水平主应力与垂直主应力的关系

国家名称	$\sigma_{h,av}/\sigma_v$			$\sigma_{h,max}/\sigma_v$
	<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	3.56
瑞典	0	0	100	4.99
南非	41	24	35	2.50
前苏联	51	29	20	4.30
其它地区	37.5	37.5	25	1.96

不同地区,变化的速度很不相同. 图 1-4 为世界不同地区取得的实测结果^[7].

霍克和布朗根据图 1-4 所示结果回归出下列公式,用以表示 $\sigma_{h,av}/\sigma_v$ 随深度变化的取值范围^[7]:

$$\frac{100}{H} + 0.3 \leq \frac{\sigma_{h,av}}{\sigma_v} \leq \frac{1500}{H} + 0.5$$

式中 H 为深度,单位为 m.

该图表明,在深度不大的情况下, $\sigma_{h,av}/\sigma_v$ 的值相当分散,随着深度增加,该值的变化范围逐步缩小,并向 1 附近集中. 如

$$H=1\,500\text{m 时, } 0.37 \leq \frac{\sigma_{h,av}}{\sigma_v} \leq 1.5$$

$$H=3\,000\text{m 时, } 0.33 \leq \frac{\sigma_{h,av}}{\sigma_v} \leq 1$$

这说明在地壳深部有可能出现静水压力状态. 图 1-5 是布朗和温泽根据后来更详细的测量资料绘制出的澳大利亚大陆平均水平主应力与垂直应力之比值随深度变化的规律图^[8],其中左限曲线的公式与图 1-4 略有不同.

赫格特(G. Herget)等人根据测量结果描绘出的加拿大平均水平主应力与垂直应力的比值随深度的变化规律示于图 1-6^[9],

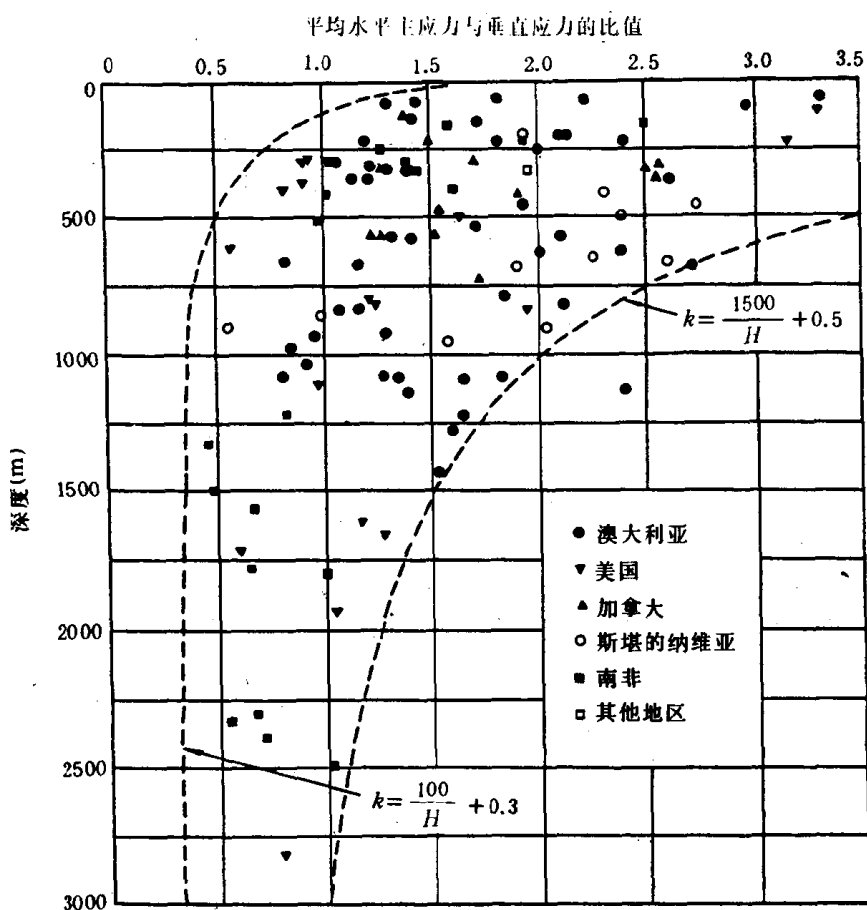


图 1-4 世界各国平均水平主应力与垂直应力的比值随深度变化的规律图

它与霍克和布朗给出的规律在地层深部有较明显的区别。

5. 最大水平主应力和最小水平主应力也随深度呈线性增长关系. 与垂直应力不同的是, 在水平主应力线性回归方程中的常数项比垂直应力线性回归方程中常数项的数值要大些, 这反映了在某些地区近地表处仍存在显著水平应力的事实。

斯蒂芬森(O. Stephansson)等人根据实测结果给出了芬诺斯堪的亚古陆最大水平主应力和最小水平主应力随深度变化的线性方程^[10]: