

1 地应力的形成及其影响因素

在地应力研究中有几个理论问题,如地应力在地球内部的分布状况、地应力的形成原因和影响因素等一直为人们所关注。对于这些问题,尽管过去有不少人进行过讨论,但是随着大量研究资料的不断积累,有关这些问题的讨论仍在进行中,而且到目前为止,还没有一个系统的阐述。本章试图就地应力的形成因素和影响因素等问题进行探讨。

1.1 地应力及其分布规律

1.1.1 地应力的有关概念

在讨论地应力的形成和影响因素之前,必须先明确地应力研究中常用的一些概念。

应力是用大小、方向及所作用的面等的关系等三个要素来表述的一种张量。地应力是地球内部应力的统称,地应力场就是地应力在一个空间范围内的分布。地应力研究中常用的术语有^[1,2]。

天然应力 (natural stress) : 在任何人工扰动之前存在于地壳岩体中的应力。

感生应力 (induced stress) : 受工程活动扰动的天然应力。

残余应力 (residual stress) : 形成应力的机制停止作用后仍然在岩体中存在的应力。这种应力可被当作是在不受外界作用的隔离体内。

构造应力 (tectonic stress) : 由于岩石圈板块的相对位移引起的应力。

重力应力 (gravitational stress) : 由于上覆岩体重量引起的应力。

热应力 (thermal stress) : 由于温度变化形成的应力状态。

物理化学应力 (physicochemical stress) : 由于岩石中的物理或化学变化产生的应力。

古应力 (paleostress) : 以前存在的但目前不再存在的应力。

远场应力 (far-field stress) : 不受非均匀性干扰的应力状态。

近场应力 (near-field stress) : 受非均匀性干扰的应力状态。

区域应力 (regional stress) : 在相对大的地质区域内的应力状态。

局部应力 (local stress) : 在一个相对小的地质区域内的应力状态。

1.1.2 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^[3~5]。

(1) 地应力是一个具有相对稳定性的非稳定应力场,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,地应力的大小和方向也是不同的。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,地应力的大小和方向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。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 3 年内有 $20^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 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 $\sigma_v/\sigma_H=0.8\sim 1.2$ 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%, $\sigma_v/\gamma H=0.8\sim 1.2$ 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,但也受到其他因素的影响。图 1-1 是 Hoek 和 Brown 总结出的世界各国 σ_v 随深度变化的规律^[6]。

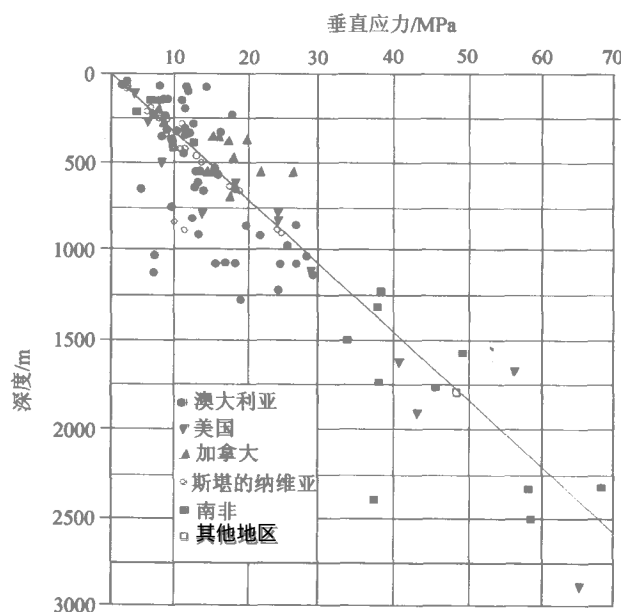


图 1-1 垂直应力随深度的变化 (Hoek E. 和 Brown E. T., 1980)

(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(表 1-1)。如果将最大水平主应力与最小主应力的平均值:

$$\sigma_{H_{\max},av} = (\sigma_{H_{\max}} + \sigma_{h_{\max}}) / 2$$

与 σ_v 相比, 总结目前全世界地应力实测的结果, 得出 $\sigma_{H_{\max},av} / \sigma_v$ 之值一般为 0.5~5.0 大多数为 0.8~1.5(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, 但在不同地区, 变化的速度很不相同。据统计, 在深度不大的情况下 $\sigma_{H_{\max},av} / \sigma_v$ 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 $H=3000\text{m}$ 时, $0.33 \leq \sigma_{H_{\max},av} / \sigma_v \leq 1$ 这说明在地壳深部有可能出现静水压力状态。

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	$\sigma_{H_{\max},av} / \sigma_v$			$\sigma_{h_{\max},av} / \sigma_v$
	<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	3.56
瑞典	0	0	100	4.99
南非	41	24	35	2.50
前苏联	51	29	20	4.30
其他地区	37.5	37.5	25	1.96

(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。

Amadei 等^[7]总结了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(表 1-2)。

表 1-2 水平应力分量随深度的变化*

文献	$\sigma_H, \sigma_h, \sigma_{Ha}(\text{MPa})$ 和 K 随深度 $z(\text{m})$ 的变化	地点和深度范围/m
Voight(1966a)	$\sigma_{Ha} = 8.0 + 0.043z$	世界数据(0~1000)
Herget(1974)	$\sigma_{Ha} = (8.3 \pm 0.5) + (0.0407 \pm 0.0023)z$	世界数据(0~800)
VanHeerden(1976)	$K_{Ha} = 0.448 + 248/z (r=0.85)$	南非(0~2500)
Worotnicki 和 Denham(1976)	$\sigma_{Ha} = 7.7 + (0.021 \pm 0.002)z (r=0.85)$	澳大利亚(0~1500)
Haimson(1977)	$\sigma_H = 4.6 + 0.025z$ $\sigma_h = 1.4 + 0.018z (r=0.95)$	密执安盆地(0~5000)

续表 1-2

文献	$\sigma_H, \sigma_h, \sigma_{Ha}$ (MPa) 和 K 随深度 z (m) 的变化	地点和深度范围/m
Lindner 和 Halpern (1977)	$\sigma_{Ha} = (4.36 \pm 0.815) + (0.039 \pm 0.0072)z$	北美洲 (0~1500)
Brown 和 Hoek (1978)	K_{Ha} 介于 $0.3 + 100/z$ 和 $0.5 + 1500/z$ 之间	世界数据 (0~3000)
Aytmatov (1986)	$\sigma_H + \sigma_h$ 介于 $9.5 + 0.075z$ 和 $5.0 + 0.058z$ 之间	世界数据 (主要为前苏联) (0~1000)
Li (1986)	$\sigma_{Ha} = 0.72 + 0.041z$ K_{Ha} 介于 $0.3 + 100/z$ 和 $0.5 + 440/z$ 之间	中国 (0~500)
Rummel (1986)	$K_H = 0.98 + 250/z$; $K_h = 0.65 + 150/z$	世界数据 (500~3000)
Herget (1987)	$\sigma_{Ha} = 9.86 + 0.0371z$ $\sigma_{Ha} = 33.41 + 0.0111z$ $K_{Ha} = 1.25 + 267/z$ $K_H = 1.46 + 357/z$ $K_h = 1.10 + 167/z$	加拿大地盾 (0~900) (900~2200) (0~2200)
Pine 和 Kwakwa (1989)	$\sigma_H = 8.8 + 0.0422z$ $\sigma_h = 6 + 0.012z$	英国 Carnmenellis 花岗岩 (0~2000)
Arjang (1989)	$\sigma_H = 15 + 0.028z$ $\sigma_h = 3.64 + 0.0276z$ $\sigma_{Ha} = 5.91 + 0.0349z$	加拿大地盾 (0~2000)
Baumgärtner 等 (1993)	$\sigma_H = 30.4 + 0.023z$, $\sigma_h = 16.0 + 0.011z$ $\sigma_h = 1.75 + 0.0133z$	KTB 试验孔 (800~3000) Cajon Pass 孔 (800~3000)
Sugawara 和 Obara (1993)	$\sigma_{Ha} = 2.5 + 0.013z$	日本岛 (0~1200)
Hast (in Stephansson, 1993)	$\sigma_H = 9.1 + 0.0724z$ ($r = 0.78$) $\sigma_h = 5.3 + 0.0542z$ ($r = 0.83$)	斯塔的纳维亚剔心法 (0~1000)
Te Kamp, Rummel 和 Zoback (1995)	$\sigma_H = 15.83 + 0.0302z$ $\sigma_h = 6.52 + 0.01572z$	KTB 孔 (0~9000)
Lim 和 Lee (1995)	$\sigma_{Ha} = 1.858 + 0.018z$ ($r = 0.869$) $\sigma_{Ha} = 2.657 + 0.032z$ ($r = 0.606$)	韩国剔心法 (0~850) 水压致裂法 (0~250)
Stephansson (1993)	$\sigma_H = 0.4 + 0.0446z$ ($r = 0.61$) $\sigma_h = 5 + 0.0286z$ ($r = 0.58$) $\sigma_H = 6.7 + 0.0444z$ ($r = 0.61$) $\sigma_h = 0.8 + 0.0329z$ ($r = 0.91$) $\sigma_H = 2.8 + 0.0399z$ ($r = 0.79$) $\sigma_h = 2.2 + 0.0240z$ ($r = 0.81$)	斯塔的纳维亚 Leeman-Hiltscher 剔芯法 (0~700) Leeman 型剔芯法 (0~1000) 水压致裂法 (0~1000)

* $\sigma_H, \sigma_h, \sigma_{Ha}$ 分别为最大、最小和平均水平应力 z 为深度。

(6) 最大水平主应力和最小水平主应力之值一般相差较大, 显示出很强的方向性。 $\sigma_{hmin}/\sigma_{hmax}$ 一般为 0.2~0.8 多数情况下为 0.4~0.8 参见表 1-3。

表 1-3 世界部分地区两个水平主应力的比值表

实测地点	统计数目	$\sigma_{Hmax,av}/\sigma_{hmax,av}$				
		1.0~0.75	0.75~0.50	0.50~0.25	0.25~0	合计
斯堪的纳维亚等地	51	14	67	13	6	100
北美	222	22	46	23	9	100
中国	25	12	56	24	8	100
中国华北地区	18	6	61	22	11	100

(7) 地应力的上述分布规律还会受到地形、地表剥蚀、风化性、岩体结构特征、岩体力学性质、温度、地下水等因素的影响, 特别是受地形和断层的扰动影响最大 (详见本章第 1.3 节)。

1.2 地应力的形成

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。岩体中的天然应力是由几种力的联合作用而形成的。在不同的情况下, 地应力场中几种应力所占的比例很不相同, 但通常是岩体重力和地壳运动产生的应力 (即构造应力场) 占优势。本书从产生地应力的机理出发, 把地应力分为区域因素产生的应力和局部因素产生的应力。区域因素作为形成因素, 产生一个地区应力场的基本背景, 而局部因素作为影响因素, 使地应力在其所影响的范围内发生局部变化。

人们对于地应力的形成原因的认识经历了漫长的过程。1912年 瑞土地质学家海姆 (A. Heim) 在阿尔卑斯山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^[8], 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

$$\sigma_h = \sigma_v = \gamma h \quad (1.1)$$

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, 前苏联学者金尼克 (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 $\mu/(1-\mu)$ 即

$$\sigma_v = \gamma h \quad (1.2)$$

$$\sigma_h = \gamma h \frac{\mu}{1-\mu} \quad (1.3)$$

式中 μ 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大小, 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 20 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。”^[9]

到了 20 世纪 50 年代初,瑞典科学家哈斯特(N. Hast)博士发明了测试地应力的仪器和方法,首先在斯堪的纳维亚半岛进行了地应力测量的工作,测得了岩石中的绝对应力值及其方向。通过对大量实测数据的分析,哈斯特发现存在于地壳上部岩石中的地应力,大多呈水平状或近水平状,且水平应力值高出垂直应力值,甚至高出几倍、十几倍^[10]。他的这一发现,从根本上动摇了延续了很长时间的地应力是重力引起的垂直应力的观点,而认为构造运动是形成地应力的一个重要因素。后来,大量的地应力测量和研究结果都表明在地壳岩体中普遍存在着水平方向的构造应力,同时,通过对比分析发现,构造应力的分布是不均匀的,也不是在各个地方都存在的。由此而认为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。人们还发现,除上述两个因素外,在一些地区岩浆侵位也是形成地应力的因素之一。

1.2.1 重力作用

岩体在重力场作用下形成自重应力,重力应力场是各种应力场中惟一能够计算的应力场。在地表近于水平的情况下,重力场在岩体内的某一任意点上造成相当于上覆岩层重量的垂直应力 σ_v [图 1-2, (1.1) 式] 则一般认为 相应的水平应力为

$$\sigma_h = \sigma_H = K \sigma_v \quad (1.4)$$

式中 K 称为岩体的侧压力系数,一般表示为

$$K = \frac{\mu}{1 - \mu} \quad (1.5)$$

对于大多数坚硬岩体,由于 γ 为 0.2~0.3 故 $K = 0.25 \sim 0.43$ 即水平应力约为垂直应力的 1/3~4/5。但是,对于半坚硬岩体如泥岩、页岩等,一方面 γ 值本身较大 故 K 值将大于上述数值 另外更重要的是这类岩体强度较低,且具有较大的蠕变性能 因此在地表以下的较深部位 在上覆岩层较大荷载的长期作用下 岩体发生塑流 使 K 值接近于 1,即该处岩体中的天然应力接近于静水应力状态。

大量的地应力测量结果表明,地壳岩体中的应力量值的变化极大,一些地区测得的水平应力小于垂直应力,而一些地区测得的水平应力大于垂直应力,而且后者十分常见。据 Aythmtov^[11] 对世界上不同地区进行的应力测量结果表明,65%~70% 情况下水平应力超过垂直应力。我国十几个水电站的地应力实测资料列于表 1-4 从表中可见 实测垂直应力可达上覆岩体自重的 1~6 倍。显然,地壳岩体中的应力分布规律不能完全按照式 $\sigma_h = \sigma_H = K \sigma_v = \sigma_v \mu / (1 - \mu)$ 来描述。形成地壳中的应力的因素除岩体重力外,还有构造应力的作用。

表 1-4 我国几座水电站水平应力与垂直应力实测资料 (刘世煌, 1990)

测量地点	岩性	埋深/m	γh /MPa	水平应力 σ_H /MPa	垂直应力 σ_v /MPa	σ_H/σ_v	$\sigma_v/\gamma h$
511 工程 2 号地下厂房	厚砂岩	98	2.47	3.86	2.57	1.5	1.04

续表 1-4

测量地点	岩性	埋深/m	$\gamma h/\text{MPa}$	水平应力 σ_H/MPa	垂直应力 σ_v/MPa	σ_H/σ_v	$\sigma_v/\gamma h$
映秀湾地下厂房	花岗岩及花岗闪长岩	200	5.30	12.36	9.92	1.25	1.87
羊卓雍电站厂房	泥质页岩及砂岩			0.528	1.545	0.34	
二滩厂房	正长岩	100	2.65	21.3	0.90	2.4	3.39
511 工程	花岗岩	50~60	1.34	1.20	4.00	0.3	2.98
三峡	微结晶泥质条带	128	3.22	15.75	6.93	2.3	2.15
	龙洞灰岩	100	2.73	8.98	4.38	2.05	1.6
太平坝 2 号洞	花岗岩、闪长岩			20.5	10.7	1.98	
白山工程	混合岩	100	28.0	27.0	18.8	1.44	6.48
以礼河三级电站	破碎玄武岩	60	1.56	1.98	2.2.2	0.89	1.42
	火山角砾岩	60	1.68	0.816	0.954	0.86	0.66
	玄武岩	175	5.07	1.9	2.38	0.87	0.46
	火山角砾岩	220	6.16	8.87	7.97	1.12	1.29
西洱河一级电站	片麻岩、云母片岩	60	1.68	8.13	6.67	1.3	3.99
云南第四电站	灰岩	0~70	1.91	1.72~2.40	1.28~1.46	1.36	0.76
鲁布革厂房	白云质灰岩	296	7.81	9.22	10.92	0.84	1.39

1.2.2 地质构造运动

早在 20 世纪 20 年代,著名地质学家李四光就曾预言,在许多地质构造中水平应力可能远远高于垂直应力。他认为这种现象在很大程度上归因于地球旋转,尤其是旋转速度周期性变化有关的角动量^[12]。根据地球表面各地质历史时期以至现代所观察到的构造形变,人们都确信在地球表面存在较强的构造应力场。20 世纪中叶以来,地应力测试水平有了相当大的提高,世界上许多地区的测试结果都证实了李四光的预言,在地壳浅部岩层中的水平应力分量往往高于垂直应力分量。不同国家在不同的岩性及构造区所完成的大量实测资料证实,在很多情况下 100~200m 深处的水平应力超过上覆岩石引起的自重应力达 10~20 倍。

板块构造理论认为,岩石层板块在大洋中脊中增生出来,大洋洋脊两侧的板块彼此分离运动。大洋岩石层板块在海沟处沉陷,下沉到软流层和地球内部中去。在这个岩石层板块“增生—分离—消减”的过程中,板块必然承受着各种构造力的作用。作用在板块上的驱动力有三种:洋脊推力、板块牵引力、海沟吸引力。

Zoback^[14]指出,有两种力作用在板块上,决定着板块内部的应力状态(图 1-3):大尺度的构造力:包括板块边界力(驱动或维持板块运动)、地球动力学过程中产生的力(如上下表面所受的负载或不均匀密度分布引起大尺度岩石层的弯曲)以及海洋岩石层冷却中的热弹性力等。局部小的尺度力:包括地形、岩石强度或弹性性质的各向异性以及剥蚀和人工开挖等因素的局部影响。通常,可以通过原地应力场的空间均匀性区别这两类力。由大尺度构造力决定的构造应力场,一般在岩石层弹性部分的若干倍(几倍至上百

倍)范围内是均匀的,而局部应力场作用范围仅为上述厚度的几分之一。大尺度的构造力可为各种大规模的板内地质学问题提供重要的边界条件。

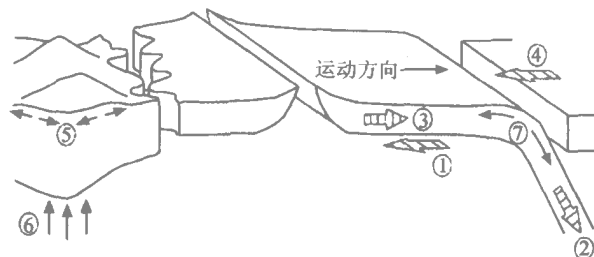


图 1-3 作用在岩石层板块上的力 (Zoback 等, 1989)
大尺度构造力 ① 岩石层底部的剪切力; ② 俯冲带处的净板块拉力;
洋脊推力; 海沟吸引力。局部构造力 ⑤ 表面荷载和弯曲; ⑥ 均
衡补偿; ⑦ 大洋岩石层弯曲

1986 年启动的世界地应力图 (WSM) 项目是一个全球性合作项目,旨在收集和解释岩石圈中构造应力场的方位和相对大小。项目受国际岩石圈计划资助,参加人员来自 18 个国家。项目选择 4 大类、6 种地质地球物理资料作为构造应力资料,即: ① 地震震源机制解; ② 钻孔崩落测量; ③ 原位测量 (水压致裂法和剔心法); ④ 年轻地质资料 (包括断层活动性和火山分布)。

最新出版的世界地应力图见图 1-4。从图中可以看出: ① 在大多数地区的上地壳存在一个均匀的应力场,由不同体积的岩石、不同深度范围和不同研究方法得到的方位是一致的; ② 在板块内部地区以挤压为主导 (逆冲和走滑应力状态),最大主应力水平; ③ 活动的伸展构造 (正断层应力状态) 发生在大陆和海洋的高地势地区 (如青藏高原地区 and 美国的西部海岸地区 见图 1-5 和图 1-6) 最大主应力是垂直的。从这些图中还可以看出,全球的地应力场具有分区性,分区的界限即为板块边界。在同一板块内,应力场相对均匀,在挤压型板块边缘附近,最大主压应力方向多与板块边界垂直,而在走滑型板块边缘,最大主压应力方向多与板块边界斜交。

受印度板块和欧亚板块相互碰撞、挤压的影响,我国各地最大主应力的分布呈明显的规律性。各点的最大主应力方向均与由该点向我国的察隅和巴基斯坦的伊斯兰堡之夹角等分线方向相吻合或相近^[1]。三向应力状态及其所决定的现代构造活动的类型呈有规律的分布:喜马拉雅前缘一带属潜在逆断型应力状态区,我国中西部广大地区属潜在走滑型应力分布区,而我国东部属于正断型和张剪型应力状态区。马杏垣^[15]根据主应力方向的统一性和稳定性以及三向主应力随深度变化的关系,以应力方向的明显转折地带和主应力值或应力梯度明显变化地带为边界,将我国地壳应力状况划分为五个区 (图 1-7)。总体而言,大致以宁夏中部和甘、青交界及川、滇中部一线为界,其东、西两部分的地壳应力状况明显不同;西部地区本世纪以来持续受到近南北方向的挤压作用,而且应力值高;东部地区近期的区域应力场总体呈近东西向,应力值低^[17]。

地质构造分析、震源的应力方向分析和大地测量结果都表明,水平构造应力的方向往往与活动带的方向密切相关,即垂直于年轻山脉和板块边缘,如阿尔卑斯—喜马拉雅和天山—蒙古—鄂霍次克地区。在挪威以及瑞典的北部和西南部,最大主压应力方向是 NW

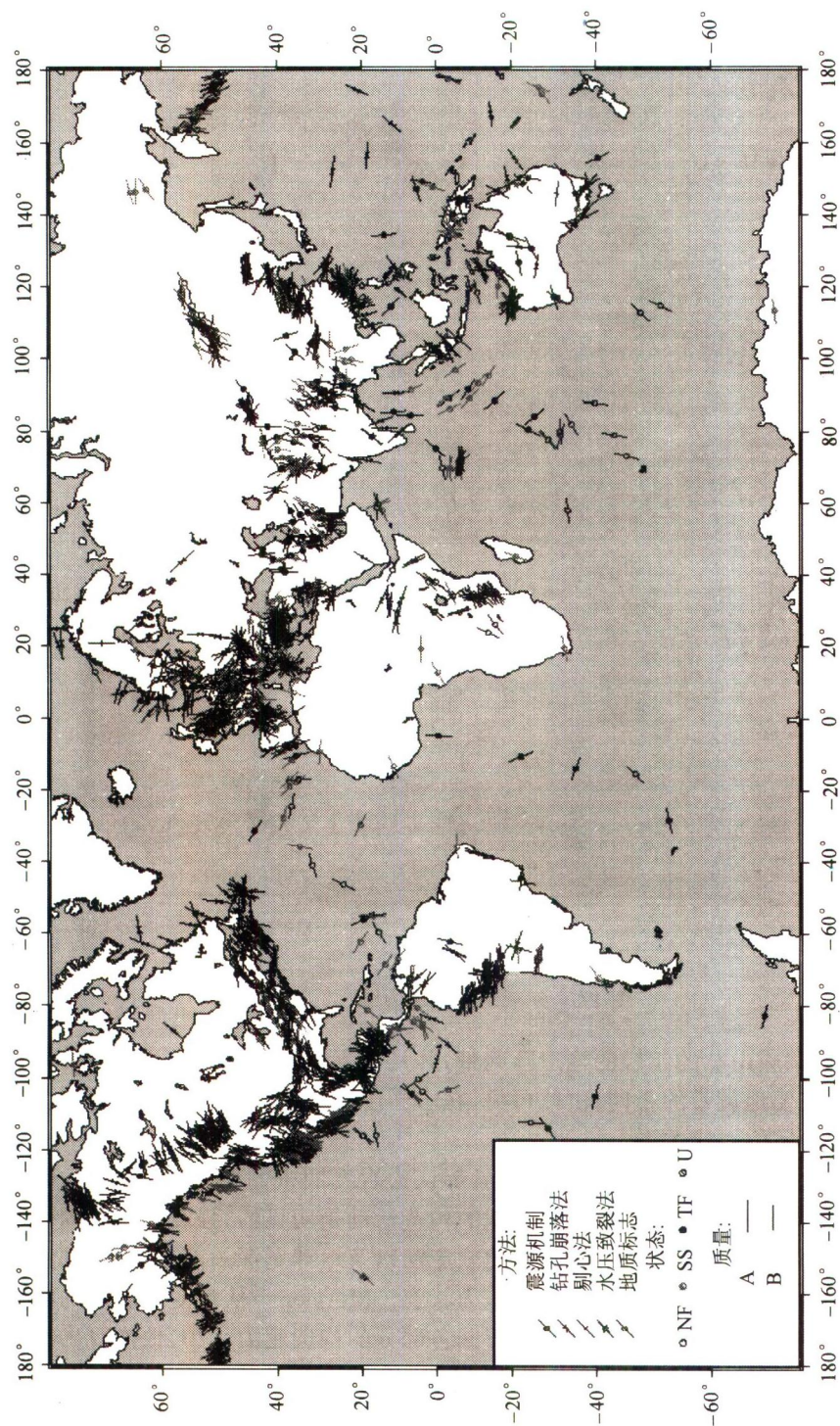


图 1-4 世界地应力图

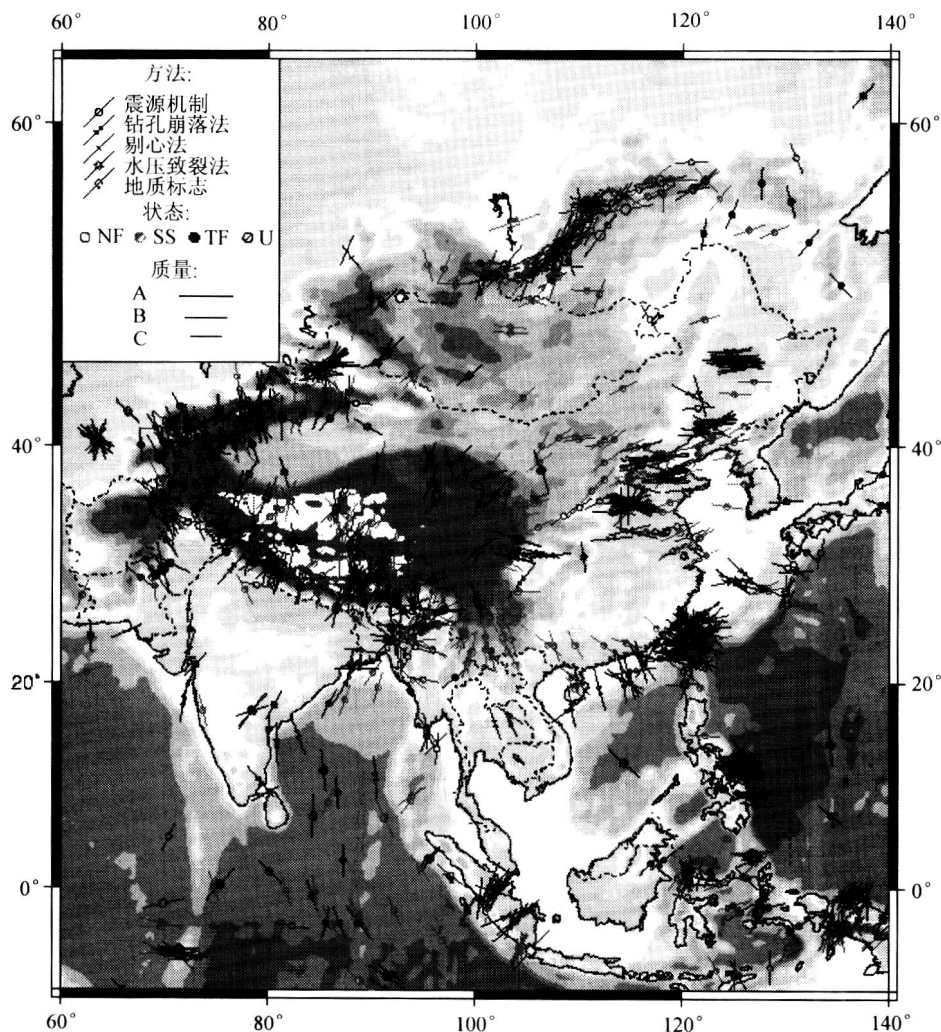


图 1-5 东亚地区地应力图

向，它垂直于形成挪威山脉的年轻的构造隆起带，并且垂直于斯堪的纳维亚的重力异常的等值线的走向和主要地震带的走向。由此可见，在水平应力的方向和现今构造作用力方向的体系之间存在一定的对应关系。

关于构造应力作用的深度问题，现在一般都认为岩石圈中的构造应力较大，而在深处，构造应力减小。这是因为，地球表层岩石圈的构造活动是明显的，强度较大的固体岩石圈能够承受较大的差应力，而在岩石圈之下的软流圈以及地球更深的部分，一般都认为只能承受非常小的差应力，即基本上处于静岩应力状态。Mercier^[16]从流变岩石学的实验资料出发，用地质温度—压力计推断了大陆岩石圈各部分的构造应力大小。他推算出在裂谷带 50km 深处约为 8MPa，60km 深处以下降为 2MPa 左右。根据岩石强度估算，在地壳下部差应力可能为 80MPa，在 50~70km 深处差应力可以降为 5MPa 左右。

过去，地应力测量一般是在几十米到几百米深的矿井中进行的。20 世纪 70 年代初

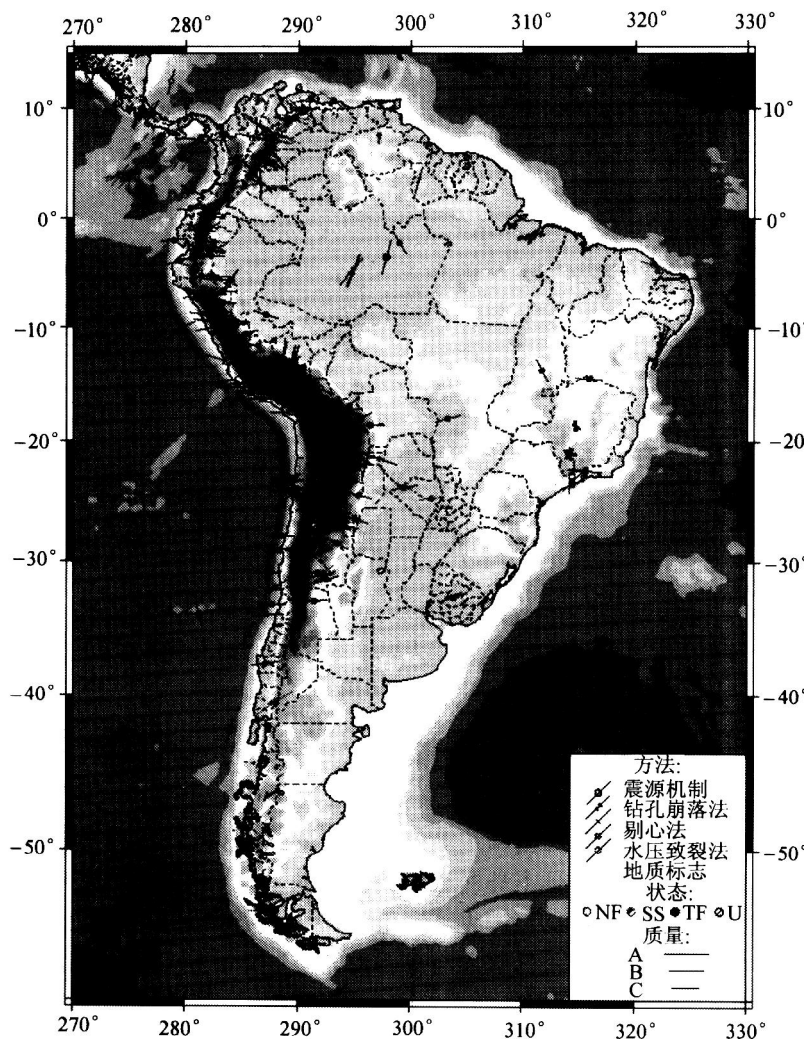


图 1-6 南美洲地区地应力图

期，水压致裂技术运用于地应力测量之后，取得了几十米至几千米深的测量结果，最深的应力测量已达 5000 余 m。这些测量资料反映了构造应力作用的深度及其在不同地区的变化。如在南非金矿井 2500m 深处的应力测量结果，600m 以上水平应力超过垂直应力，但是 600m 以下水平应力则小于垂直应力，可以认为，该地区 600m 深度可作为构造应力作用的深度。在冰岛 大约在 200 余 m 深度上水平应力与垂直应力的关系发生了变化；在日本，获得的结果与南非的结果相似。加拿大的地壳应力测定结果表明，在 2km 以上的深度上，水平应力始终大于垂直应力，与哈斯特在斯堪的纳维亚的测量结果一致。

高祥林等^[18]用三维有限元模拟方法，研究了日本俯冲带引起的岛弧—弧后地区的应力形成与传播。模型的结构与物理状态以日本岛东北附近为背景，模型具有几何不规则和力学不均匀特征，假定的边界条件和加载方式主要用于模拟俯冲板块运动。用有限元劈节

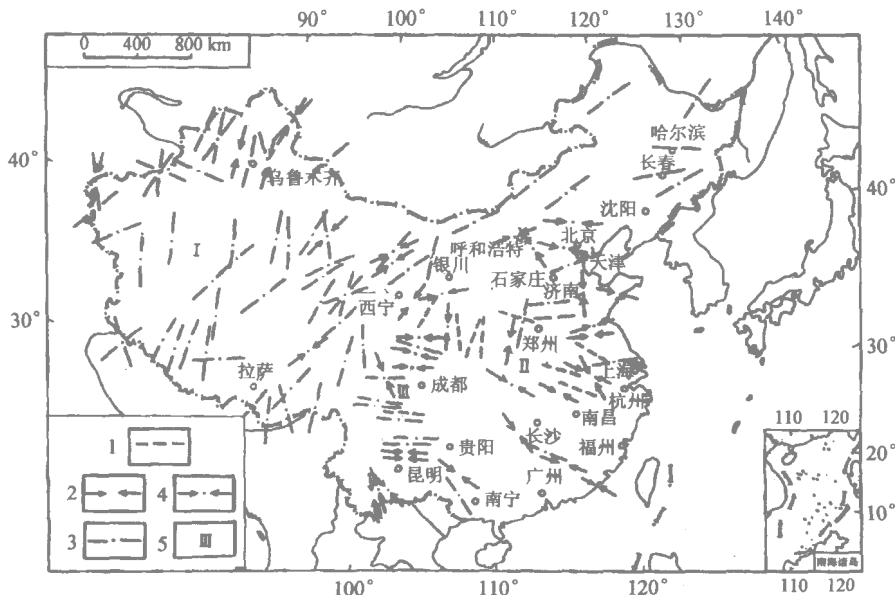


图 1-7 我国现今应力分区 (据《中国岩石圈动力学地图集》编委会, 1991)

1. 主压应变方向; 2. 实测主压应力方向; 3. P 轴方向; 4. 地震形变带及反映的作用力方向; 5. 构造应力活动分区及编号

点技术表示断层的错动以及俯冲板块与周围地幔间的不耦合。他们发现：①以大洋板块水平运动为表现形式的板块推挤力是岛弧—弧后地区挤压应力的主要来源，仅有小部分边界应力传播到上覆板块内，对亚洲大陆边缘的应力影响小。软流圈的蠕变在一定程度上可促进应力从海沟向岛弧传播，使日本岛西边缘的应力有增大趋势。②因俯冲板块与周围地幔之间的密度差异引起的板块拉力，产生了分散的挤压应力和引张应力，俯冲板块内的应力分布特征与异常密度分布相关，日本岛与日本海岩石圈内产生引张应力，相对高的应力值出现在日本岛的西侧。海沟附近动态形式的断层闭锁使板块边界应力在断层附近局部集中，在岛弧和弧后地区只出现很小的应力。在弹性变形的情况下，位错量相当于 7 级的板间地震逆断层运动产生的应力影响，仅限于断层附近很小的范围，对弧后地区的应力状态几乎没有影响。

构造应力的方向、量值随时间和空间而有较大的变化。如澜沧江小湾坝址区，根据地质构造的表现特征，从构造形成的应力场演变历史上，可确定坝区至少经历了五期构造应力场的作用^[19]。这五期构造应力场的作用顺序依次为：近 NNE 向→NWW 向→NE-NNE 向→NW 向→近 NS 向 (图 1-8)。又如金沙江溪洛渡坝址区自燕山期以来也经历了五期构造应力场作用，依次为：NWW 向→NEE 向→NNE 向→NNW 向→NWW 向。

为了评价构造应力及岩体的自重应力对于工程岩体中应力状态的影响程度，常用基于一定现场实测应力的数值模拟分析。由于岩体中的地应力主要来源于自重应力及构造应力的作用，因此在计算结果中除去自重应力便可得到现存的构造应力，以此判别构造应力对工程岩体应力的影响程度。其数值模拟的计算域应该取得足够大，以使计算结果具有较高的精度及可靠性。

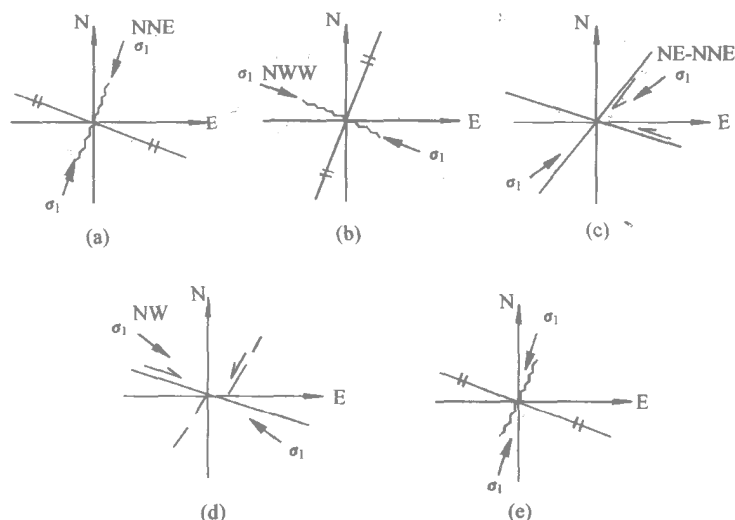


图 1-8 小湾坝址区构造应力场演化历史示意图 (黄润秋等, 1996)

马启超^[20]根据实测资料建立有限元数学模型, 并经过多元回归法分析初始应力场后的成因分析, 认为工程岩体中的地应力来源是岩体自重和地质构造运动。由于二者影响效应所起作用不同, 决定了地应力场总的分布规律也不同。他因此提出判断地应力场的形成原因是重力还是构造运动的标准如下:

(1) 在逐步回归中按岩体自重对产生岩体中的应力的贡献 (V_{rk}) 和地质构造运动对产生岩体中应力的贡献 V_u 大小来判断 即若 $V_{rk} > V_u$, 则地应力的形成受岩体自重的控制 反之 若 $V_{rk} < V_u$ 则受地质构造因素的控制。

(2) 按岩体自重应力或地质构造应力在回归应力场中所占的比重, 即自重应力和构造应力与回归得到的应力 (简称回归应力) 的比值判断。若自重应力与回归应力的比值大于 50% 或构造应力与回归应力的比值小于 50% 说明地应力场受岩体自重因素控制 若构造应力与回归应力的比值大于 50% 或自重应力与回归应力的比值小于 50% 则是受地质构造因素控制。

(3) 按垂直应力分量与水平应力分量的比值, 即 $\sigma_x(\sigma_y)/\sigma_z = m$ 或 $(\sigma_x + \sigma_y)/2\sigma_z = m$, 若 $m < 1$ 则表明地应力场受岩体自重因素控制, 反之, $m > 1$ 则受地质构造因素的控制。

(4) 按最大主压应力倾角 β_1 的大小 若 $\beta_1 > 45^\circ$, 则表明岩体自重应力因素在地应力场中起主要作用 若 $\beta_1 < 45^\circ$, 则是受地质构造因素控制。

根据上述标准判别, 认为二滩工程的地应力场是以构造应力为主的应力场, 而鲁布革工程的应力场是以自重应力为主导的应力场。

万宗礼^[21]提出用应力比值从定量角度来分析两种成分的比重。计算应力比值, 可采用两种简便方法: ①计算铅直自重应力 σ_H 与以水平面为截面的该面上法向应力 σ_n 之比, 即 σ_H/σ_n ; 计算自重应力的正应力和与实测应力主应力和之比。

在第一种方法中, 首先计算铅直自重应力, 然后计算水平截面法向应力, 最后计算计算铅直自重应力 σ_H 与以水平面为截面的该面上法向应力 σ_n 之比, 即 σ_H/σ_n 。

(1) 铅直自重应力的计算。

设在某一测点, 不考虑构造应力而只考虑自重应力时, 该点的铅直自重应力为 $\sigma_v = \gamma H$ (γ 为岩石容重, H 为上覆岩层厚度)。

(2) 水平截面法向应力的计算。

根据弹性力学理论, 可推导出, 截面上法向应力的计算式为

$$\sigma_n = \sigma_1 \cos^2 \theta_1 + \sigma_2 \cos^2 \theta_2 + \sigma_3 \cos^2 \theta_3 \quad (1.6)$$

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 为三向主应力, $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 为各主应力与截面法线的夹角。方向余弦的计算式为:

$$\cos \theta_i = 1 - \frac{\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta - 2 \cos \alpha \cos \beta \cos \gamma + (\sin \beta - \sin \alpha)^2}{2} \quad (1.7)$$

式中, α 为结构面 (截面) 法线倾伏角; β 为某一主应力伏角; γ 为截面法线方位角与某一主应力方位角之差; θ_i 为某一主应力和截面法线的夹角。

由于取了水平面为截面, 法线方向为铅直方向, 故 (1.7) 式变为

$$\cos \theta_i = 1 - \frac{\cos^2 \beta + (\sin \beta - 1)^2}{2} \quad (1.8)$$

将各点的地应力测量数据代入式 (1.1) 和 (1.3) 便可计算出各 σ_n 。

然后计算应力比值 σ_H / σ_n 并取 $\sigma_H / \sigma_n \%$ 为 η 。

σ_H 是考虑自重应力引起的某点的铅直方向的应力, σ_n 是某点实测的地应力值在铅直方向上的分量, 它既包括自重应力又包括构造应力, 而 η 的实质就是自重应力占失策应力的百分数, 它简明地反映了地应力的成因。

在第二种方法中, 首先计算自重应力, 然后计算实测应力, 最后计算自重应力的正应力和与实测应力主应力和之比 η 。

(1) 自重应力的计算。

在峡谷地区, 岩体内任一点的应力状态在直角坐标上的变换是比较复杂的, 既是仅自重引起的应力在直角坐标上各量值的计算也是如此。为了方便计算, 场地自重应力可按下式粗略计算:

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = \frac{\mu}{1-\mu} \gamma H$$

式中, μ 为岩石泊松比; γ 为岩石容重; H 为上覆岩层厚度。

则自重应力正应力和为

$$\sum \sigma_{\text{自}} = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z$$

静水压力 (球张量)

$$\sigma_m = \sum \sigma_{\text{自}} / 3$$

(2) 实测应力计算。

实测应力主应力和为

$$\sum \sigma_{Ei} = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$$

静水压力

$$\sigma_m = \sum \sigma_{Ei} / 3$$

应力偏量分量

$$S_1 = \sigma_1 - \sigma_m$$

$$S_2 = \sigma_2 - \sigma_m$$

$$S_3 = \sigma_3 - \sigma_m$$

应力比值

$$\eta = (\sum \sigma_{ax} / \sum \sigma_{Ei}) \%$$

用上述两种方法的计算得到黄河上游某坝址区 η 值分别为 25.5%~48.1% 和 18.1%~28.5% , 说明该场地的地应力主要为构造应力。

1.2.3 岩浆侵入作用

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。

与上述两种应力场不同,由岩浆侵入引起的应力场是一种局部应力场。

1.3 影响地应力的因素

在工程实践中 人们总是希望测到工程区地应力场的确切方向、量值和动态变化。然而到目前为止 所积累的大量应力资料中 绝大部分是在距地表不远的岩体中取得的 所测得的应力值,实际上是地壳运动和岩体重力作用形成的应力场与各种局部影响因素的影响叠加后的应力 有时甚至后者起了控制作用 从而使测得的应力量值和方向变化十分复杂 而局部应力和区域应力之间有相当大的差别 这就给地应力实测资料的解释和应用带来很大的困难。

一个地区的岩体中的应力场除受岩体自重和地壳运动控制外,还与该地区的已有的地质构造、地形、岩体的力学性质等影响因素有关。认识这些因素对地应力场分布的影响规律 是正确分析地区应力场和使用应力测量计算结果的重要基础。

关于影响地应力的因素,在有关的文献特别是国外的文献中不同的作者的认识有较大的区别。如 Brady 和 Brown^[22]认为有地形、侵蚀和地壳均衡、残余应力、侵入体、构造应力、破裂和结构面以及温度的变化等。Hudson 等^[23]认为产生高水平应力的原因有侵蚀作用、构造活动、岩石各向异性、结构面。Amadei 和 Stephansson^[7]把影响地应力的因素归结为岩性(地层)各向异性、地质构造和非均匀性、地形、构造活动、侵蚀、冰川作用和超固结作用、边界条件和时间、地球球面弯曲等。陈宗基认为地应力是由于岩体的自重、地形、板块运动、剥蚀及封闭应力引起的^[24]。显然,上述认识没有区分出产生地应力的因素和真正影响地应力的因素,但同时又说明,影响地应力的因素是很多的。本章主要阐述地质构造、地形、岩性等因素的影响。

1.3.1 地质构造的影响

岩体很少是均匀的,特别是在大陆地壳中。岩体地质的变化与地质构造和非均质性的存在可以影响到地应力的分布和量值,而且也是现场测量到的结果具有分散性的原因之一^[25]。Hudson 和 Cooling 认为^[26],受结构面和围岩材料相对强度的关系的影响,结构面附近应力可能会出现以下三种情况:①如果结构面是张开的,最大主应力转向平行于结构面;②如果结构面是由一种类似于围岩的材料组成,主应力不受影响;③如果结构面内的材料是刚性的,最大主应力转向垂直于结构面(图 1-9)。一般,地质构造和非均匀性干扰区域应力场,使局部应力场与区域应力场有很大差别,而且在地质构造发育的岩体中应力

的变化往往可能十分复杂 (图 1-10)。

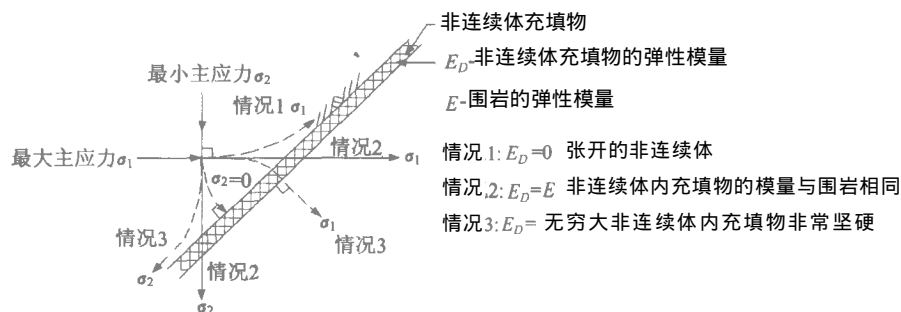


图 1-9 非连续体对应力状态的影响 (Hudson 等, 1997)

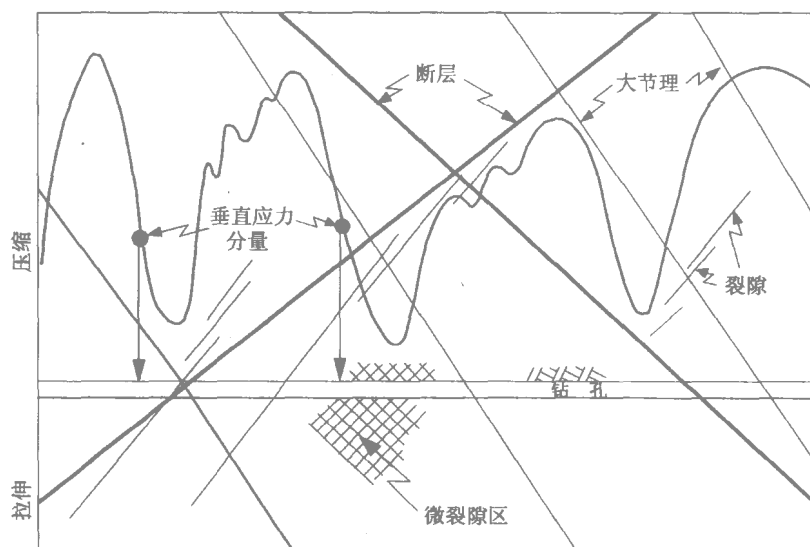


图 1-10 一个理想化岩体的垂直断面以及垂直应力分量可能的变化情况 (Hudson 等, 1997)

地质构造的类型包括断裂、褶皱、隆起和凹陷, 对地应力测量结果的分析表明, 这些构造类型对地应力均有影响。

许多文献中都有关于在经过结构面、岩脉、断层、剪切带、不整合面、非均质矿体时地应力发生变化的情况。Stephansson 等^[27]报道了斯堪的纳维亚跨过断层达 10MPa 以上的大应力突变。Aleksandrowski 等^[28]发现小到断层大到主断层系的构造形迹都能造成钻孔崩落方位的明显转向, 因而, 同一个钻孔中测得的应力方位有较大的变化, 而且局部应力方位的测量结果与区域应力方位不同。Sugawara 和 Obara 通过在距日本 Atotsuguwa 断层 1.25km 处用剔芯法测量应力, 发现断层对其附近的地应力有影响。测量到的最大和中间主应力平行于断层面, 最小主应力垂直于断层面, 且与其他两个主应力分量相比, 最小主应力的量值大大减小^[29]。在加拿大地下研究室 (URL) 所进行的多种手段的地应力测量同样表明, 小到微裂隙, 大到主逆断层, 对地应力都有明显影响, 断层两盘的应力大小和

方向都有差别^[30]。据 Martin 和 Chandler 在 URL 一条断裂附近的 209 号洞 最小主应力轴近水平 并垂直于断裂 而到 30m 以外, 最小主应力轴变成直立的^[31]。

从更大尺度看, 最明显的例子是圣安德烈斯断层及其附近跨过断层的应力方位的变化。大量的地应力测量结果表明, 在圣安德烈斯断层附近, 最大主应力方位与断裂近垂直, 为 NE—SW 向 而远离断层 为近南北向^[32]。在非常大的尺度上, 欧洲的构造应力场的分布受阿尔卑斯这样的地质构造带的影响^[33]。

除节理、断层外 岩体中的应力还因局部非均质地层、岩脉和矿体等的出现而变化。Ar-jang 在加拿大地盾几个直立的矿体附近的矿井中研究了最大和最小应力的方位。他发现 最大水平应力往往垂直于矿体, 而最小水平应力平行于矿体走向^[34]。Herget 在研究和统计加拿大地盾区应力测量资料时发现, 在该区的一些局部地带垂直应力及平均水平应力随深度的分布均呈明显高于一般情况的异常状态 (图 1-11)。而且指出, 这种应力分布的异常情况总是出现在断层市剪切带附近 在这类地区修建大型水库常有诱发地震产生^[35]。

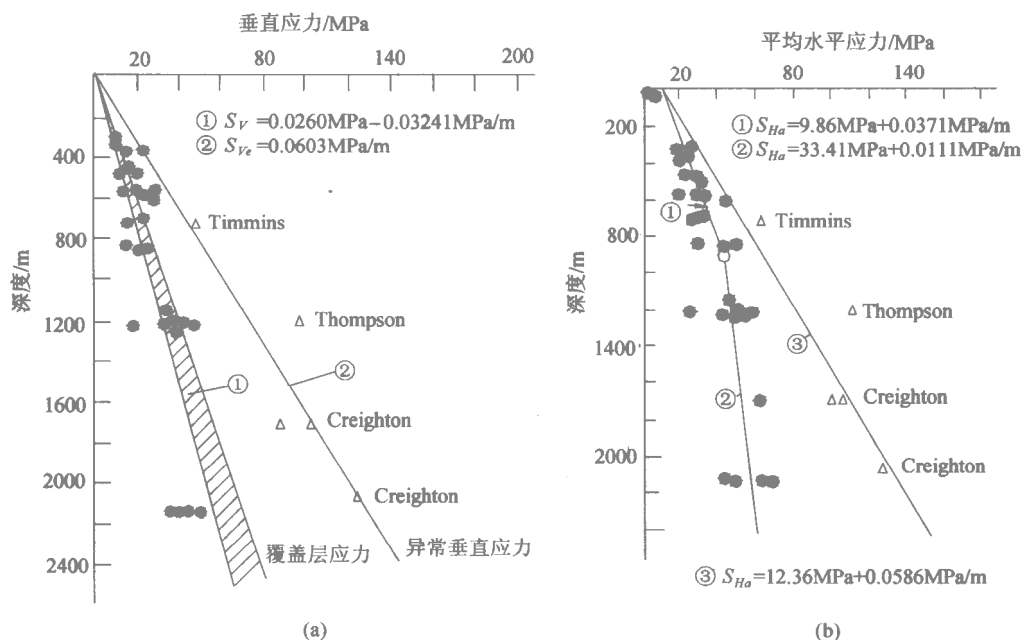


图 1-11 加拿大地盾局部地带内的应力异常分布 (Herget, 1982)

(a) 垂直应力; (b) 水平应力

断裂构造对地应力场的影响问题将在后面几章中详细阐述。

褶皱构造对地应力的影响表现在, 褶皱类型与应力值间存在一定关系, 并且同一褶皱的不同部位应力值也是有差异的。格佐夫斯基等注意到, 最大的应力值出现在背斜地区, 较小的应力值出现在向斜地区, 处于中间状态的是平缓的斜坡地区和盆地^[36]。

阿尔泰区兹良诺夫斯克矿区位于兹良诺夫斯克背斜的附加背斜褶皱上。测量区位于背斜顶部 距地表深 150m, 在两个互为垂直的水平钻孔中用应力解除法进行了测量, 一个钻孔垂直于背斜走向, 一个钻孔平行于背斜走向。测量结果表明, 最大主应力方向近水平 并垂直于背斜走向, 主要是张应力; 中间主应力近水平并平行于背斜走向, 其量值接近于