



Geostress Measurement Methods and Engineering Application

# 地应力测量方法和工程应用

©刘允芳 尹健民 刘元坤 刘鸣 等著

长江出版传媒 湖北科学技术出版社

# 地应力测量方法和工程应用

*Geostress Measurement Methods  
and Engineering Application*

刘允芳 尹健民 刘元坤 刘鸣 等著

国家重点基础研究发展计划 973 项目(2011CB710600)

国家自然科学基金项目(51379022)

资助

湖北科学技术出版社

2014

## 作者简介



刘允芳，教授级高级工程师，1936年4月生，浙江奉化人。1961年毕业于上海交通大学工程力学系。曾任长江科学院岩基研究所总工程师等职。

在40余年工作中，主持负责过三峡工程、广州抽水蓄能电站等大型水利枢纽的岩石力学、地应力测量与研究 and 地下洞室稳定性分析研究工作。主持了“七五”、“八五”国家重点科技攻关项目和国家自然科学基金资助项目的子题研究。尤其在地应力测量和研究方面有比较深刻的认识。主持的“CJS-1型钻孔三向应变计”地应力测量设备和技术、“深钻孔地应力测量和地应力场分析及其应用”等项目，通过技术鉴定，评审为国际先进水平，多次获得省部级科技进步奖。公开发表学术论文50余篇，其中地应力测量和研究方面论文占4/5，其中“水压致裂法三维地应力测量”和“水压致裂法地应力测量破裂准则的探讨”等论文曾获得湖北省优秀论文奖。

## 内 容 提 要

地应力对于岩石工程建设的重要性日益突出，而地应力测量技术的发展又日新月异，早已引起国内外普遍重视。本书系统地论述了当前国内外通用的各种地应力测量方法的理论，测量原理，测量元件和测量仪器以及实测数据处理技术。并论述了根据地应力实测资料和地质条件确定大范围工程区的地应力场的分析方法。特别是讨论了我国岩石工程在地应力测量和研究方面的主要成就。

本书理论扎实、观点新颖、视野开阔、实例丰富，可供地质、水工、矿山、隧道、军工、地震以及地面、地下、边坡岩石工程的科研、设计等工程技术人员和大专院校师生、研究生参考。

# 序

如果说岩体这类介质有许多有别于其他介质的重要特性的话，那么由于岩体的自重和历史上地壳构造运动引起并残留至今的构造应力等因素导致岩体具有初始地应力（或简称地应力）是最具有特色的性质之一。

众所周知，许多重大工程不是建在岩基之上（如大坝）就是建在岩体之中（如隧道、地下空间等），或是就在岩体中开展各种类型的生产活动（如采矿等）。就岩体工程而言，如不考虑岩体地应力这一要素，实难进行合理的分析和得出符合实际的结论。地下空间的开挖必然使围岩应力场和变形场重新分布并引起围岩损伤，严重时导致失稳、垮塌和破坏。这都是由于在具有初始地应力场的岩体中进行开挖所致，因为这种开挖“荷载”通常是地下工程问题中的重要荷载。由此可见，如何测定和评估岩体的地应力，如何合理模拟工程区域的初始地应力场以及正确和合理地计算工程问题中的开挖“荷载”，是岩体力学与工程问题中不可回避的重要问题。

正因为如此，在我国岩体力学发展史中有关地应力测量、地应力场模拟等问题研究和地应力测试设备的研制一直占有重要的地位。

我国岩体地应力测量方面的研究和设备研制始于 20 世纪 50 年代末。这方面的先驱工作当推由已故的李四光院士指导的中国地质科学院地质力学研究所的研究工作和由已故的陈宗基院士指导的长江科学院三峡岩基专题研究组和中国科学院武汉岩土力学研究所的研究工作。经过 40 余年的发展,我国的地应力测量与研究已经从无到有,各种测量手段齐备,许多专业组织已经遍布全国,在许多工程中已积累了丰富的经验和实测数据,基本上满足了工程设计方面的需要。我国在这方面的研究水平为国际同行所瞩目。

刘允芳先生的这本专著从一个侧面反映了我国地应力测量和研究方面所取得的重大进展和水平。此书系统地论述了地应力测量方法方面的理论、原理,并介绍了各类型的测量元件和仪器。关于地应力场的模拟和实测数据的处理技术在书中也有详细论述。书中给出的有关三峡工程、广州抽水蓄能电站以及深圳抽水蓄能电站工程等的地应力测量数据和地应力场分析工作都是十分宝贵的资料。

我结识刘先生很早,大概是在 20 世纪 60 年代的初期。那时他刚从上海交通大学工程力学系毕业后分配到长江科学院三峡岩基专题研究组工作。我当时是中科院武汉岩土所的一名研究实习员,奉派在三峡岩基组参加协作。刘先生自 70 年代中期起一直在长江科学院岩基所主持和领导地应力方面的研究和测试工作,取得了许多成果。他不但研制成功了 CJS-1 型钻孔三向应变计等设备,而且在国内首次在同一钻孔中采用水压致裂法和套钻孔

应力解除法进行对比试验研究。他主持的在三峡工程和广蓄工程中用套钻法测试地应力的最大深度超过了 300m 大关，为国内同类型工作之最。这本专著也是他 50 年来从事地应力测量方面取得的丰富经验的总结。此书的出版对从事这方面工作的科技人员将有很大的参考价值。

我国在地应力测量方面已取得长足进步。当今国际大陆科学深钻工程计划（ICDP）正式执行，我国的科学深钻工程作为国家重大科学工程之一也已经启动。用何种新方法可在深钻孔中比较精确和方便地测量地应力也是我们面临的重大课题。愿我国地应力测量方面的科技人员能奋发前进，为赶超国际先进水平和攀登科技高峰而努力奋斗。

中国工程院院士

葛修润

2014 年 8 月 10 日

于上海交通大学岩土力学与工程研究所

# 前 言

岩石力学是近一个世纪来兴起和发展的一门新兴学科,回顾一个世纪来岩石力学的丰硕成果,令人鼓舞。地应力测量与研究的崛起和发展,是 20 世纪在岩石力学领域中非常振奋人心的一项科研成果,它的应用已普及水电、矿山、交通、军工等系统的工程建设和地震机制研究中。地应力场资料是所有地面、地下、边坡岩石工程的设计、衬砌计算和稳定性分析必不可少的基本资料。

人们对岩体内蓄存有地应力的客观事实的认识,比半个世纪前要深刻得多。现在,从工程选线、选点和工程布局,到工程具体设计、断面形状确定和稳定性分析,都已经考虑了地应力资料。在岩石工程建设中,设计上已经改变了把围岩作为结构的一种荷载的认识,而把围岩与支护一起用来共同抗衡外荷载的作用;施工上已经密切注意围岩开挖导致卸荷松弛带形成和沿软弱结构面位错的产生,以及导致高地应力地区发生灾害的可能性。充分利用地应力存在有利于工程建设的潜在能力,是地应力研究的首要任务。

地应力测量与研究在我国经济建设中将愈益显得重要,尤其是在今后西部开发中更为突出。例如,西部的水力、石油、煤炭等资源的开发和利用,都需要了解工程地区的地应力场,而这些资料却是西部地区所缺少的。在西藏、新疆、青海等省份的广大地区,地应力实测资料几乎空白。地应力状态,西部地区与东部地区大不相同,西部是我国高地应力地区。例如,近 30 多年在西部兴建的拉西瓦、李家峡、二滩、天声桥、鲁布格等水电工程以及甘肃的金

川镍矿地下采掘都曾遇到高地应力问题。有的在勘探钻孔中出现饼状岩心,有的在开挖中发生岩爆或边坡崩裂等现象。因此可以断言,在今后的西部开发中,地应力的测量与研究将占据重要地位。

长江科学院岩基研究所是我国最早开展岩石力学及地应力测量研究的单位之一。1958年,其前身“国务院三峡岩基专题研究组”成立伊始,就开展岩体应力测量的研究工作。当时在三峡工程平善坝坝址开展了大量的岩体表面应力试验,继而在贵州乌江渡电站又开展了这类试验,都取得了可喜成果。从20世纪70年代开始,我国地应力测量进入了钻孔应力测量阶段。岩基研究所研制了CJS-1型钻孔三向应变计,并在实践中不断改进,解决了测读解除应变全过程的难关。1985年11月对“CJS-1型钻孔三向应变计”地应力测量设备及其测试技术项目,通过技术鉴定,评审为国内领先水平,1986年荣获水电部科技进步奖。1984年,长江科学院从瑞典引进了深钻孔水下三向应变计,在吸收、消化国外先进技术的基础上,从实践中对该设备不断进行改进和元件更新。后来又引进了水压致裂法地应力测量的全套设备,从而开展了深钻孔地应力测量的研究。在近20个水利工程的套钻孔应力解除法测量中,最大测量深度在有水状态下,已超过了300m大关。例如,1985年在三峡工程中最大测量深度达304m,1989年在广州抽水蓄能电站第一期工程中最大测量深度达307m,2001年在惠州抽水蓄能电站中最大测量深度达365m。并在国内首次在同一钻孔中采用水压致裂法和套钻孔应力解除法进行对比试验研究。除了对地应力测量元件和测量技术以及实测资料的处理技术不断探索和改进外,还开展了大范围工程区地应力场的反演分析工作。1991年“深钻孔地应力测量和地应力场分析及其应用”项目,通过技术鉴定,评审为国际先进水平,1992年荣获水利部科技进步奖。1995年,长江科学院在澳大利亚的CSIRO应变计基础上研制了

新型“CKX-97 型空心包体式钻孔三向应变计”，并可在有水的钻孔中进行测量，大大提高了现场测量的成功率。目前，这种应变计最大测量深度达 30m，是地应力测量中应用较多的测量设备。另一种深钻孔地应力测量的水压致裂法也有较大发展，通过引进消化，设备测试能力已超过 1 000m，2013 年在新疆引额供水工程、云南滇中引水工程的最大测量深度达 730m 和 824m。50 多年以来，长江科学院地应力测量足迹已遍及全国 180 余个工程和非洲的赞比亚、津巴布韦，东南亚的马来西亚、新加坡、柬埔寨、缅甸、巴基斯坦等国家。

作者自参加工作后，就在长江科学院岩基研究所参与地应力测量与研究的工作达 14 年，1975 年以后又一直负责并领导地应力项目组(或专业室)工作。因此有幸亲自经历长江科学院地应力测量与研究的全过程。在这项工作中，积累了近 30 余个工程的实践经验，并在理论上不断地总结提高，先后在《岩石力学与工程学报》、《岩土工程学报》等 6 种学术期刊和全国学术会议公开出版的论文集上发表论文近 30 篇。同时，主持的“CJS-1 型钻孔三向应变计”地应力测量设备和技术项目和“深钻孔地应力测量和地应力场分析及其应用”项目，先后通过技术鉴定，分别评审为国内领先水平和国际先进水平，并于 1986 年和 1992 年荣获水电部和水利部科技进步奖。退休以后又被返聘继续进行地应力测量原理的研究工作，又公开发表论文 20 余篇。本书就是在此基础上作更深入的系统研究和论述。

本书系统全面地论述了当前国内外通用的各种测量地应力的理论与方法、测量原理和测量元件、测量仪器，以及实测数据处理技术等等。还论述了根据地应力实测资料和地质条件确定大范围工程区的地应力场的分析计算方法。本书的一个特点是理论基础扎实，公式推导严密；另一个特点是注重工程应用，书中列举了三峡工程、广州抽水蓄能电站、深圳抽水蓄能电站、清远抽水蓄能电

站等多达 16 个工程的地应力测量应用实例。

本书是 2000 年 9 月由湖北科学技术出版社出版的《岩体地应力与工程建设》的姐妹篇,本书格式同“前书”,除了对“前书”进行大量的修改、补充以外,增加了最近的地应力测量研究内容,例如复变函数研究方法,应力反分析计算等等,补充了重要的工程应用实例。尤其对第 4 章水压致裂测量法作了大量的修改和补充,对目前已经广泛应用的 3 个不同方向钻孔中和单钻孔中进行水压致裂法三维地应力测量的两种测量方法,从理论上作了更详尽的论证。另外,对与工程实际情况不完全符合的钻孔轴向为一个主应力方向的假设和采用最大单轴拉应力破裂准则,进行深入分析,并提出对水压致裂法测量成果进行校核与修正,其中许多内容是作者新近的研究心得。因此本书比《岩体地应力与工程建设》的内容增加(或更改)了近三分之一。

最后,作者要诚挚地感谢中国工程院院士葛修润教授在百忙中审阅本书,并为本书写序,提出了很多宝贵意见。体现了我国岩石学研究先驱对地应力测量与研究的热忱关怀和支持。

本书为国家重点基础研究发展计划(973)课题《高地应力区工程卸荷滑坡演化与致灾机理》(No. 2011CB710603)、国家自然科学基金项目《地下洞室高应力软岩卸荷扩容时效孕灾机制与长期稳定性研究》(No. 51379022)研究内容的一部分。

本书由刘允芳、尹健民、刘元坤、刘鸣、李永松、艾凯、韩晓玉、周春华等合著。

由于作者水平所限,书中不当之处难免,敬请读者不吝赐教。

# 1

## 地应力及其测量

### 1.1 地应力的基本概念

蓄存在岩体内部未受扰动的应力,称之为地应力(geostress)或原岩应力(in-situ stress)。地应力是岩体在漫长地质年代里由于地质构造运动和其自重等作用,在岩体中产生的内应力效应,地应力也称为岩体初始应力(initial stress)。当工程开挖以后,应力受到开挖扰动的影响而形成的应力,则称为二次应力(secondary stress)或诱导应力(induced stress),而不受开挖影响部分的应力,相对开挖而言,也可称为岩体初始应力。地应力虽然在本质上是一种内应力,但从地质演变进程来看可以认为是一种残余应力。

岩石力学学科是土力学派生发展起来的。岩石的力学性质和指标,类同其他材料的力学性质和指标,容易被人们认识和接受;而地应力是蓄存在岩体内部的一种内应力,不像力学性质指标那样是岩体的一种固有特性,而是岩体存在的一种力学状态,相同的工程岩体的地应力状态因地而异,它是天然岩体在工程建设开挖扰动之前所具有的自然力学状态,这也是岩体与其他材料的本质

区别。这种概念在很长一段时期里不易被人们所认识和接受。在 20 世纪 70 年代,我国兴建长江第一坝——葛洲坝水电站时,当基岩开挖引起的地应力释放致使基岩沿软弱夹层的位错达十几厘米时,真正认识到研究地应力存在的重要意义。因此,人们对地应力的认识和深化,是 20 世纪人类科学文化的一大进步。

人们对地应力的认识只是近百年的事情。地应力的概念最早是瑞士著名的地质学家海姆(Heim)提出来的。19 世纪末 20 世纪初通过观察阿尔卑斯山大型越岭隧洞围岩的工作状态时,发现隧洞在各个方向都承受着很高的压力,1905—1921 年提出了地应力为“静水压力”假设,他认为,岩体中有应力蓄存,并处于近似静水压力状态,应力的大小等于其上覆岩体的自重,即岩体中各个方向的应力均等于  $\gamma H$  ( $\gamma$  为岩石的重度,  $H$  为研究点的深度)。这就是著名的海姆假说。此后,20 世纪 20 年代中期,苏联学者金尼克(Диник, А. Н.)于 1926 年又根据弹性理论分析,假定岩体是均匀的、连续的弹性介质,提出岩体的铅垂应力为  $\gamma H$ ,而水平应力等于  $\frac{\mu}{1-\mu}\gamma H$  的假说( $\mu$  为岩石的泊松比,  $\frac{\mu}{1-\mu}$  为侧压系数)。认为地应力只与岩体自重有关的观点代表了 20 世纪早期一些学者较为普遍的看法。按此理论,海姆假说只是金尼克假说在  $\mu = 0.5$  时的一个特例。两者不同点只是在侧压系数有所差异。

然而,随着地应力现场实测资料越来越多的积累,充分说明:在浅层的地应力状态绝大多数都与海姆和金尼克的假说存在一定差异。20 世纪 50 年代初期,瑞典科学家哈斯特(Hast, N.)研制了压磁式应力计,于 1952—1953 年在斯堪的纳维亚半岛的 4 个矿区,利用钻孔测量了浅层的地应力。哈斯特通过对测得的大量数据进行分析研究,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为主导的力学状态,且水平应力值普遍比铅垂应力值高得多,甚至高出几倍、十几倍,他认为这可能是与地层的褶

皱构造产生的横向压力有关。这一发现从根本上动摇了地应力以垂直自重应力为主导的观点。自此,许多国家也相继发展了各种在钻孔中测量地应力的方法,都得出大体相同的结果。例如,英国 New South Wales 海岸陡壁的煤矿,岩体的水平应力分量大于铅垂应力分量;葡萄牙 Picote 电站,岩体的铅垂应力分量比其上覆岩体的自重高得多。1978 年霍克(Hoek, E.)和布朗(Brown, E. J.)研究了许多地方的实测资料得出:岩体的应力状态就一般而言,其铅垂应力分量是由上覆岩体的自重产生的,而水平应力分量则介于同一深度的铅垂应力分量的一半左右到三倍多。然而在深部的岩体(例如距地表千米以上)的应力状态,却较接近海姆假说。大量的地应力实测资料和研究结果表明,岩体中普遍存在着水平方向的地质构造应力,并且地质构造应力的分布是不均匀的。由此也使人们逐渐认识到岩体重力作用和地质构造运动是地应力形成的主要原因。

## 1.2 地应力的组成成分和影响因素

### 1.2.1 地应力的组成成分

地应力的来源,按照陈宗基院士的观点,来自五个方面<sup>[1][2]</sup>,即岩体自重、地质构造运动、地形势、剥蚀作用和封闭应力。

自重应力是地心对岩体的引力。地质构造运动引起的应力,包括古构造运动应力和新构造运动应力。前者是地质史上由于构造运动残留于岩体内部的应力,也称为构造残余应力;后者是现今正在形成某种构造体系和构造型式的应力,也是导致当今地震和最新地壳变形的应力。地形势与剥蚀作用引起的应力仅影响到其周围的局部应力场,例如,高山峡谷或深切河谷底部的应力往往比较集中;地表剥蚀会使该处地应力的铅垂应力分量降低较多,而水

平应力基本保持不变等等。封闭应力是地壳经受高温高压引起岩石变形时,由于岩石颗粒的晶体之间发生摩擦,部分变形受到阻碍而将应力积聚封闭于岩石之中,并处于平衡状态,即使卸载,其变形往往仍不能完全恢复,故称封闭应力。

对上述地应力的组成成分进行分析,分清主次,突出重点,一般把地应力的组成确立为由两个主要成分所组成:岩体自重应力和地质构造应力。

综合上述各种成分在岩体内部构成了一个地应力场,这是岩石与其他任何材料的根本区别。地应力的测量与研究就是探索地应力的变化规律,力求充分利用有利的地应力场,把工程建设在安全可靠的基础之上。

## 1.2.2 地应力的影响因素

地层浅部岩体地应力分布非常复杂,其基本原因在于它受到的影响因素众多,归纳起来大致有如下几个方面:

### 1) 地质构造对地应力的影响

地质构造对地应力的影响,主要表现在影响应力的量值及其分布和传递方面:

(1)在均匀应力场中,断裂构造对地应力量值和方向的影响是局部的;

(2)在同一地质构造单元内,被断层或其他大结构面切割的各个大块体中的地应力的量值和方向均较一致,而靠近断裂或其他分离面附近,特别是拐弯处、交叉处及两端,因为都是应力集中的地方,所以它的量值和方向有较大变化;

(3)在活动断层附近和地震地区,地应力量值和方向都有较大变化。

## 2) 地形地貌和剥蚀作用对地应力的影响

地形地貌对地应力的影响是复杂的。苏联托克托尔贝址河谷地区左右岸地应力完全不同。左岸铅垂应力  $\sigma_v$  和水平应力  $\sigma_h$  分别为 2.0~12.0MPa 和 5.7~13.3MPa, 而右岸为 2.8~7.2MPa 和 3.0~5.6MPa。同时从谷坡表面到山体内部分为三个不同应力带。即靠近谷坡为应力降低带, 中间为应力升高带, 内部为应力平衡带, 在平衡带内侧压系数  $\lambda=0.95\sim 1.24$ 。

剥蚀作用对地应力也有显著的影响。剥蚀前, 岩体内存在一定数量的铅垂应力和水平应力。剥蚀后, 铅垂应力降低较多, 但有一部分来不及释放, 仍保留了这部分原来的应力量值; 而水平应力却释放很少, 基本上保留原来的应力量值。这导致了岩体内存在着铅垂应力比现有地层厚度所引起的自重应力还要大得多的应力量值。

## 3) 岩石力学性质对地应力的影响

从能量的积累观点来看, 岩体地应力也可以说是能量积累与释放的结果。岩体应力的上限必然要受到岩体强度的限制。因此, 岩石力学性质对地应力的影响是十分明显的。杰格尔(Jaeger, J. C.) 曾提出地应力与岩石抗压强度成正比的概念。但是, 如果以弹性模量  $E$  为主要因素来探索二者的关系, 则更具有重要意义。从实测资料来看两者的关系, 例如, 当  $E=50\text{GPa}$  以上的岩体, 大主应力  $\sigma_1$  一般为 10~30MPa, 而  $E=10\text{GPa}$  以下的岩体应力很少超过 10MPa<sup>[3]</sup>。

根据李光煜、白世伟的统计资料认为, 当  $E$  分别为 2GPa 和 100GPa 时, 地应力分别为 3MPa 和 30MPa。即  $E$  相差 50 倍时, 地应力却相差 10 倍。所以说, 在相同的地质构造环境中, 地应力量值是岩性因素的函数<sup>[4]</sup>。

由此可见, 弹性模量较大的岩体有利于地应力的积累, 所以地震和岩爆容易发生在这些部位, 而塑性岩体容易产生变形, 不利于

应力的积累。在软硬相交和互层的地质结构,就会由变形不均匀而产生附加应力。

此外,软硬不同的岩石或重度不同的岩体,会造成自重应力分布不均匀和出现塑性状态深度不等的现象。

#### 4) 水对地应力的影响

水对地应力的影响是显而易见的。岩石自身包含有节理、裂隙,而节理、裂隙中又往往含有水。尤其在深层岩体中,水对地应力的影响是非常显著的。由于岩体中水的存在而形成岩石孔隙压力,它与岩石骨架承受的应力共同组成岩体的地应力。

三峡工程库区茅坪镇 800m 深孔孔隙压力测量结果<sup>[5]</sup>表明,孔隙压力大体相当于静水压力(各测段的误差仅为 0.01 ~ 0.03MPa)。如果钻孔深 120m,地下水位离孔口高程 20m,则孔隙压力近似为 1MPa。

#### 5) 温度对地应力的影响

岩体温度对地应力的影响表现在两个方面:地温梯度的影响和岩体局部受温度的影响。

地温梯度的影响:各地区地温梯度  $\alpha$  是不相同的,但一般为  $\alpha = 3^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ,岩体的体膨胀系数约为  $\beta = 10^{-5}$ ,如果岩体的弹性模量为  $E = 10\text{GPa}$ ,那么岩体的温度应力约为:

$$\sigma_t = H\alpha\beta E = 0.003H(\text{MPa}/\text{m})$$

可见,岩体温度应力为压应力,并随深度  $H$  的增加而增加。在相同深度情况下,温度应力仅为铅垂向自重的 1/9 左右。从这个意义上讲,有人认为岩体温度应力场可以忽略不计,但实际上在许多情况下,温度应力是应当考虑的。

岩体温度应力场一般是静水压力场,因此,温度应力场也可以与自重应力场互相代数迭加。

岩体局部受温度的影响:岩体局部寒热不均,会产生收缩和膨胀,导致岩体内部产生应力。例如,大块侵入体、岩流或小型岩脉、