

高等教育精品教材



隧道力学

SUIDAO LIXUE

主 编 张向东

副主编 张树光 贾宝新

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

高等教育精品教材

隧 道 力 学

主 编 张向东

副主编 张树光 贾宝新

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书以岩土力学、弹塑性力学、流变力学等力学原理为基础,以综合研究方法为主导思想,突出地下工程的特点,讲述了隧道力学的基本原理及应用。

本书共分六章。第一章为原岩应力,介绍原岩应力的组成、自重应力场的计算、构造应力场的形成与特点,以及地壳浅部原岩应力变化规律;第二章为围岩的工程性质及分类,介绍岩块、结构面、岩体的组构特征、本构关系与强度理论,流变模型理论的基本知识,以及地下工程围岩的分类方法;第三章为地下工程围岩稳定性分析,介绍地下工程围岩的弹性、弹塑性应力与位移状态,以及地下工程围岩稳定性的判断方法;第四章为围岩压力理论与计算,介绍围岩压力的形成与分类、各种地压的计算方法,以及围岩与支护的相互作用原理;第五章为隧道的支护结构与支护设计,主要介绍隧道支护结构的类型及其力学特性、隧道支护结构的设计方法;第六章为新奥法施工与监控测量,主要介绍新奥法的特点与基本原则、监控测量的主要项目与方法。

本书主要作为土木工程、采矿工程、工程地质以及工程力学等专业的研究生、本科生的教材,也可作为大专院校教师以及从事设计、施工、科研等工作的工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

隧道力学 / 张向东主编. —徐州:中国矿业大学出版社,
2010.3

ISBN 978 - 7 - 5646 - 0535 - 3

I. 隧… II. 张… III. 隧道工程—工程力学—高等学校—
教材 IV. U451

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 213400 号

书 名 隧道力学

主 编 张向东

责任编辑 杨传良 潘俊成

责任校对 徐 玮 王美柱

出版发行 中国矿业大学出版社

(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

排 版 中国矿业大学出版社排版中心

印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司

经 销 新华书店

开 本 787×1092 1/16 印张 16.25 字数 406 千字

版次印次 2010 年 3 月第 1 版 2010 年 3 月第 1 次印刷

定 价 27.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)



前 言

隧道力学是研究隧道围岩的物理力学性质和稳定性,以及设计与施工方法,是以岩石力学、土力学、工程地质力学、弹塑性力学、流变力学等为基础的综合性的学科,其基本原理和方法适用于所有的地下工程(包括隧道、隧洞、地下铁道、矿山井巷工程、军事人防工程、地下厂房、仓库、机库、油库等)。随着经济和现代技术的发展,世界各国地下工程开挖量与日俱增。我国地下工程的开挖量也很大,在我国基本建设中占有很大的比例。因此,研究和掌握隧道力学,并将其应用于实际工程问题的解决,对于促进我国现代化建设具有十分重要的意义。

本书是在前人研究的基础上,结合作者近十几年的科研成果和教学经验,并吸收近年来该领域的最新研究成果,加以系统论述而成。全书主要阐述了原岩应力场、围岩的工程性质与分类、地下工程围岩稳定性分析、围岩压力理论与计算、隧道的支护结构与设计、新奥法施工与监控测量等内容。在编写过程中,着重于阐述基本理论和如何应用理论来解决实际工程问题。

本书主要作为土木工程、采矿工程、工程地质以及工程力学等专业研究生或本科生的教学用书,也可作为大专院校教师的等参考用书,还可作为从事设计、施工、科研等工程技术人员的参考资料。

本书由辽宁工程技术大学张向东(教授、博士生导师)、张树光、贾宝新编著。在编写过程中,东北大学、大连理工大学、北京交通大学、中国矿业大学、辽宁工程技术大学的许多老师提出了宝贵的意见和建议,在此对他们表示衷心的感谢!

由于作者水平有限,错误遗漏之处在所难免,希望读者批评指正,并提出宝贵的意见和建议。

编 者

2008年9月



目 录

绪论·····	1
第一章 原岩应力·····	4
第一节 概述·····	4
第二节 自重应力场·····	5
第三节 构造应力场·····	7
第四节 地壳浅部原岩应力变化规律·····	10
第二章 围岩的工程性质及分类·····	14
第一节 岩石的力学性质·····	14
第二节 岩石强度理论·····	20
第三节 岩石的流变性质·····	38
第四节 岩体结构面(弱面)的分类及其力学特性·····	59
第五节 岩体的力学性质·····	73
第六节 地下工程围岩分类·····	82
第三章 地下工程围岩稳定性分析·····	97
第一节 概述·····	97
第二节 地下工程围岩的弹性应力状态·····	99
第三节 地下工程围岩的弹塑性应力状态·····	116
第四节 地下工程围岩的位移·····	123
第五节 地下工程围岩稳定性的判断·····	129
第四章 围岩压力理论与计算·····	133
第一节 围岩压力分类·····	133
第二节 围岩与支护共同作用分析·····	134
第三节 地压的计算理论与方法·····	139
第五章 隧道的支护结构与设计·····	156
第一节 隧道维护原则·····	156



第二节 支护结构的类型与选择.....	158
第三节 支护结构的力学特性.....	175
第四节 隧道支护结构设计.....	181
第六章 新奥法施工与监控测量.....	215
第一节 新奥法.....	215
第二节 监控测量.....	220
参考文献.....	242



绪 论

在公路、铁路、金属矿山、煤矿、水利水电、军事和人防工程中,需要开掘大量的隧道、井巷和各种硐室,这些统称为地下工程。

地下工程所处的地质环境和受力状态与地面工程是完全不同的,但长期以来都是沿用适应于地面工程的理论和方法来解决在地下工程中遇到的各种问题,因而常常不能正确地阐明地下工程中出现的各种力学现象和过程,使地下工程长期处于“经验设计”和“经验施工”的局面。这种局面与迅速发展的地下工程的现状是极不相称的,如不迅速改变,势必造成地下工程设计和施工的盲目性。因此,寻求用于解决地下工程问题的新理论、新方法、新材料、新结构型式等已成为近几十年来许多科学工作者和现场工程师的共同愿望。由此而形成的一个以岩石力学、土力学、工程地质力学、弹塑性力学、流变力学等为基础的综合性学科——隧道力学,成为现代工程力学的一个重要分支。

地下工程设计与施工的根本目的是在各类岩土体中修筑各种服务目的的、长期稳定的硐室结构体系。从结构角度看,这个结构体系由周围地质体(岩体或土体)和各种支护结构构成,即硐室结构体系=周围地质体+支护结构。它的形成是通过一定的施工过程或者一定的力学过程来实现的。其施工过程为:

原始岩体 $\xrightarrow{\text{开挖}}$ 毛洞 $\xrightarrow{\text{支护}}$ 支护体系 $\xrightarrow{\text{时间}}$ 稳定硐室

与之相适应的力学和变形过程如下:

原始固结状态 $\xrightarrow{\text{开挖}}$ 开挖后应力状态 $\xrightarrow{\text{支护}}$ 支护体系应力状态 $\xrightarrow{\text{时间}}$ 终极应力状态
(一次应力状态) (二次应力状态) (三次应力状态) (四次应力状态)

原始固结状态 $\xrightarrow{\text{开挖}}$ 支护前位移 $\xrightarrow{\text{支护}}$ 支护结构位移 $\xrightarrow{\text{时间}}$ 终极稳定位移

隧道及其他地下工程的设计与施工和地面工程是不同的,其基本思想和方法如图 0-1 所示。

由此可见,隧道力学所涉及的内容是比较广泛的,包括从对地质体的研究一直到形成稳定硐室为止的全部内容。要解决这些问题,就需要有关地质学、地质力学、岩体力学、土力学、弹塑性力学、流变力学以及各种支护结构所用的建筑材料、结构设计原理和方法等各方面的知识。因此,隧道力学是一门综合性比较强的边缘学科。

隧道力学的研究历史并不长,早期多为零星的研究,且多数借助土力学和地面工程的理论与方法,其发展较为缓慢。近几十年来,由于公路、铁路、水利水电等行业的发展,隧道力学不仅在实验手段上,而且在理论上也有了比较显著的进步。例如,在实验和现场测试手段

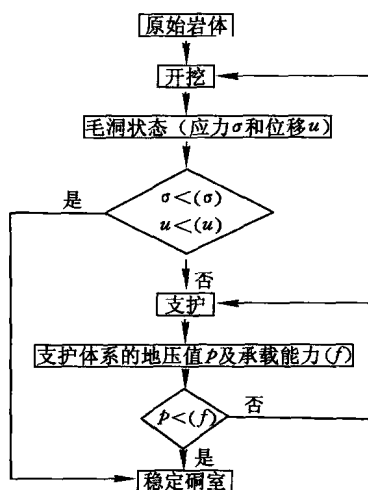


图 0-1 隧道设计与施工的基本思路

方面,刚性试验机和伺服试验机的应用将对岩体力学性质的研究提高到一个新水平,使人们可以获得岩体的全应力应变曲线;结构面的试验与研究,使人们对岩体性质的认识日趋深入;各种电、声、光、热、磁及机械式传感器的应用,使人们对地下工程的应力、位移、破碎发展、稳定状态等能够进行有效的监控。在理论方面,由于弹塑性理论和流变力学的发展、有限元法和边界元法等数值计算方法的应用,使隧道力学从过去只能分析某些均质的、各向同性的线弹性以及简单断面形状的工程课题发展到目前已经能分析某些不均质、非线性、各向异性、弹塑性、黏弹性、黏弹塑性,以及上述多种因素组合、断面形状比较复杂的工程课题;在隧道的设计与施工方面,已有很多成功的经验,不过从目前总的情况看,隧道力学还存在许多问题有待进一步研究解决,距成熟阶段相差尚远,所以隧道力学属于一门发展中的学科。

隧道力学的基本内容大体上可归纳为以下几个方面。

(1) 地质工程体的研究

这里的地质体为地下工程的地质环境。众所周知,地下工程是处于各种地质环境中的地下结构,因此,它必将受到周围环境的强烈影响。所谓的地质环境包括地质体的形成及其经历、初始应力场、各种地质体的物理力学性质、地质体的结构特性、地质体的工程分类等。科学地认识地质环境对地下结构体系的影响是正确进行结构设计和施工的前提。

(2) 隧道开挖后围岩的力学动态及过程

隧道开挖以前,围岩处于初始应力的平衡状态之中。当洞室开挖后,破坏了这种初始的平衡状态,出现了应力的重新分布、岩体积聚能量的释放、周围地质体的性质变化、围岩的变形及断面的收敛,甚至隧道崩塌等各种力学现象。了解和认识从毛洞(无支护的地下工程)的形成到破坏的整个过程将有助于充分、有效地发挥围岩—支护体系的重要组成部分在整个支护体系中的作用。

无支护地下工程的稳定性及其破坏机理是隧道力学研究的主要内容之一。大量的地下工程实践证实,无支护隧洞或洞室是可以自稳的。

(3) 围岩压力的形成与计算

对于大部分地下工程,需要采取有效的措施控制围岩的变形和破坏,即应修筑支护结



构。砌筑支护结构后,围岩与支护共同作用,直接表现为地压的形式。因此,研究地压的形成过程、表现形式、大小及控制方法是合理进行地下工程支护结构设计的前提条件。

(4) 隧道支护体系的评价

一个完整的支护体系是由周围岩体和支护结构共同组成的。因此,地下工程支护体系的设计必须包括对二者相互作用的分析,以及对周围岩体支护效应和支护结构效应的评定。而解决后者的关键是正确地认识和了解各类支护结构(现浇混凝土或钢筋混凝土、喷射混凝土、锚杆、钢支架等)的构造及其支护效应,准确地确定支护结构与围岩的接触状态及其相互作用机理,并建立两者相互作用的力学模式。在此基础上,选择合理的支护结构形式及设计方法。

(5) 时间对整个支护体系的影响及评价

材料(包括岩体、土体、混凝土、金属材料等)的性质,尤其是长期性质都与时间因素有关。因此,构成地下工程支护体系的岩体和支护结构也必将受到时间的影响。例如,支护结构参与工作的时间、围岩压力的时间效应、岩体或混凝土的徐变、流变对应力应变的影响等。

(6) 施工和支护过程的力学评价

前面已指出,地下工程的形成是通过开挖和支护两个主要施工阶段完成的,所采用的掘进方法支护方法必然对整个地下工程的稳定产生一定的,甚至是极为重要的影响。例如,全断面开挖或分部开挖、爆破开挖或非爆破开挖、木支架或钢支架、一次支护是否及时、二次支护的最佳时机、仰拱的封闭时间等都对地下工程的稳定性具有重要的影响。因此,在隧道力学中,施工技术的研究是很重要的。实际上,隧道工程是一个经验性很强的学科,长期以来都是凭经验设计和施工的。但在这些大量的、丰富的经验中有许多都是符合科学的,有一定的理论基础。把这些切实可行的经验提高到理论上进行认识和理解是隧道力学的又一个重要任务。



第一章

原岩应力

第一节 概 述

原岩应力是指开掘地下工程以前或远离地下工程(影响圈之外)的岩体中的原始应力。原岩应力是引起地下工程围岩应力重分布、变形和破坏的力的根源,其相当于地面建筑的外荷载。

地下工程的一个重要的力学特征是:地下工程是修建在应力岩体之中的,该应力即为原岩应力。所以,应力岩体的状态就会极大地影响着在其中发生的一切力学现象,这一点与地面工程是不相同的。

所谓应力岩体,是指具有一定应力历史和一定应力场的岩体,它在地下工程开挖前是客观存在的。在这种岩体中修建地下工程就必须了解其天然状态,其中最有意义的是岩体的初始应力场。它的形成与岩体构造、性质、埋藏条件以及构造运动的历史等有密切关系。

原岩应力最基本的组成因素是岩体自重,由于上部岩体对下部岩体的重力作用,在岩体中必然产生自重应力,从而在天然岩体中产生自重应力场。除此之外,在地质构造运动现今仍在活动,或残存其影响的地区,地质构造应力也是原岩应力的重要组成部分。例如:喜马拉雅山在2万~3万年前还是一个与现今的地中海相连的内陆海,而今已成为世界最高峰,目前仍在继续上升。这说明在地壳中还长期存在着一种促使构造运动发生和发展的内在力量,这种力量就是以水平应力为主的地质构造应力。另外,在个别条件下,地温、熔岩活动、地下水和瓦斯等也对原岩应力有不同程度的影响。

任何时间和地点,岩体的自重应力是永存的,其他因素都不一定并存。在某些条件下,非自重的因素可能变为最主要的因素。所以,原岩应力的具体问题应具体分析。但总的来说,影响原岩应力的主要因素是岩体自重和地质构造运动,其他的因素是次要的,一般都具有局部性而作为特殊情况考虑。

$$\sigma = \sigma_r + \sigma_T \quad (1-1)$$

式中 σ_r ——自重应力分量,MPa;

σ_T ——构造应力分量,MPa。

原岩应力场是不取决于人类开挖活动而客观存在于岩体中的自然应力场,这种自然应力场是在地壳形成的亿万年过程中逐渐形成的。因此,原岩应力场是一个随时间变化的非稳定应力场。但有时为了方便研究问题,将原岩应力场简化为稳定的应力场。



第二节 自重应力场

地心对岩体的引力使原岩体处于受力状态,由此而引起的岩体应力称为自重应力。它可以通过计算获得,其计算理论一般是建立在假定岩体为均匀连续介质的基础之上的。

一、海姆公式(Haim, 1878)

海姆认为,原岩体的垂直应力为上覆岩体自重,且在漫长地质年代中由于地下岩体蠕变的结果,造成各向处于等压状态,即静水压力状态(图 1-1)。

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = \gamma Z \quad (1-2)$$

式中 γ ——岩体平均容重,一般取 25 kN/m^3 ;

Z ——岩体中某点的深度, m。

在静水压力状态下,岩体无剪应力,任意方向都是主方向。

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \gamma Z \quad (1-3)$$

二、金尼克公式(А. Н. Динник, 1925)

金尼克假设地表面为水平面,地下岩体为线弹性体,其垂直应力等于上覆岩体的自重。

$$\sigma_z = \gamma Z \quad (1-4)$$

在假设岩体为线弹性体的条件下,应满足广义胡克定律。

$$\epsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)] \quad (1-5)$$

$$\epsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \mu(\sigma_x + \sigma_z)] \quad (1-6)$$

在自重应力作用下,地下岩体在水平方向上都受到其相邻岩体的约束作用,不可能发生横向变形。

$$\epsilon_x = \epsilon_y = 0 \quad (1-7)$$

由式(1-7)可得:

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{\mu}{1-\mu} \sigma_z = \lambda \sigma_z = \lambda \gamma Z \quad (1-8)$$

式中 λ ——水平应力系数或侧应力系数, $\lambda = \frac{\mu}{1-\mu}$, MPa;

μ ——泊松比,无因次。

在自重作用下,剪应力 $\tau_{xy} = \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0$,则按式(1-8)计算的应力为主应力。

显然,当垂直应力已知时,水平应力的大小取决于岩体的泊松比 μ 。大多数岩体的泊松比 $\mu = 0.15 \sim 0.35$,则 $\lambda = 0.18 \sim 0.54$ 。因此,在自重应力场中,水平应力通常是小于垂直应力的。

深度对原岩应力状态有着重大的影响,随着深度的增加,垂直应力 σ_z 和水平应力 $\sigma_x = \sigma_y$ 都在增大。但围岩本身的强度是有限的,当 σ_z 和 $\sigma_x = \sigma_y$ 增加到一定值后,各向受力的围岩将处于隐塑性状态。在这种状态下,岩体的变形参数(E 和 μ)是随深度而变化的。当深度

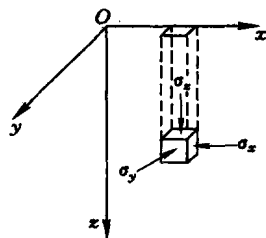


图 1-1 原岩自重应力计算



增加到一定数值后,泊松比 μ 接近 0.5,则水平应力系数 λ 接近 1.0,即与静水压力状态相似,此时岩体接近于流动状态。

由此可见,岩体中的原岩应力状态是随深度而变化的,其应力状态可视围岩的不同,分别处于弹性、隐塑性和流动三种状态,相应的侧应力系数也不同。岩体的隐塑性状态在坚硬岩石中约在距地面 10 km 以下,也有可能浅部产生,如在岩石强度低的地段。通常情况下,在隧道及浅部地下工程所涉及的范围,都可视原岩应力场为弹性的。

对于垂直层状岩体,其自重应力场可按下述公式计算(图 1-2),即:

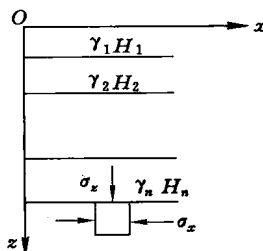


图 1-2 层状岩体原岩应力的计算

$$\text{第 1 层} \begin{cases} \sigma_{x1}^{\perp} = 0 & (\sigma_{x1}^{\perp} = \sigma_{y1}^{\perp} = 0) \\ \sigma_{x1}^{\parallel} = \gamma_1 H_1 & (\sigma_{x1}^{\parallel} = \sigma_{y1}^{\parallel} = \lambda_1 \gamma_1 H) \end{cases} \quad (1-9)$$

$$\text{第 2 层} \begin{cases} \sigma_{x2}^{\perp} = 0 & (\sigma_{x2}^{\perp} = \sigma_{y2}^{\perp} = \lambda_2 \gamma_1 H) \\ \sigma_{x2}^{\parallel} = \gamma_1 H_1 + \gamma_2 H_2 & (\sigma_{x2}^{\parallel} = \sigma_{y2}^{\parallel} = \lambda_2 \gamma_1 H_1 + \lambda_2 \gamma_2 H_2) \end{cases} \quad (1-10)$$

⋮

$$\text{第 } n \text{ 层} \begin{cases} \sigma_{xn}^{\perp} = \sum_{i=1}^{n-1} \gamma_i H_i & (\sigma_{xn}^{\perp} = \sigma_{yn}^{\perp} = \lambda_n \sum_{i=1}^{n-1} \gamma_i H_i) \\ \sigma_{xn}^{\parallel} = \sum_{i=1}^n \gamma_i H_i & (\sigma_{xn}^{\parallel} = \sigma_{yn}^{\parallel} = \lambda_n \sum_{i=1}^n \gamma_i H_i) \end{cases} \quad (1-11)$$

上述各式所表述的自重应力场是理论性的。实际上由于地壳运动的结果,岩层会产生各种变形,如变成各种倾斜状的、弯曲的等。在这些情况下,围岩的原岩应力状态也有所改变。例如,在背斜情况下,由于岩层成拱状分布,使上覆岩层重力向两翼传递,而直接处在背斜轴下面的岩层受到较小的应力(图 1-3)。在被断层切割的楔形岩体中(图 1-4),也可观察到类似的情况。下窄上宽的楔形岩体移动时,受到两侧岩石的夹制,因而使应力减小;反之,下宽上窄的岩块则受到附加荷载的作用。大量的理论研究和实测资料表明,地质工作形态改变了重力应力场的初始状态,这在实际工作中有时是不可忽视的。另外,地表形态对初始应力场也将产生很大的影响。

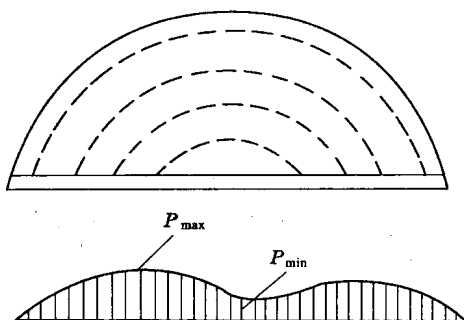


图 1-3 背斜构造的自重应力

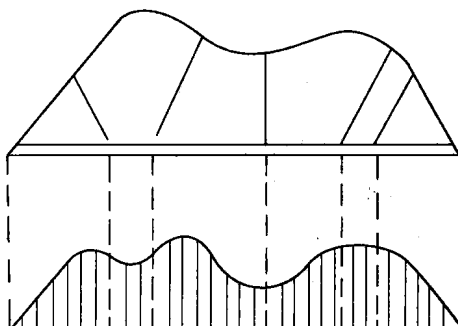


图 1-4 断层构造中的自重应力



第三节 构造应力场

由于地质构造运动而产生的应力称为地质构造应力,地质构造应力在空间上的分布规律称为地质构造应力场。

如前所述,原岩应力场主要是由自重应力场和构造应力场构成的。地质力学认为,地壳各处发生的一切构造变形与破裂都是地应力作用的结果。因而地质力学就把构造体系和构造形式在形成过程中的应力状态称为构造应力场,它是动态的。

由于构造应力场的不确定性,很难用函数形式表达。它在整个原岩应力场中的作用只能通过某些量测数据加以分析。实测结果表明:

① 地质构造形态不仅改变了自重应力场,而且除了以各种构造形态获得释放外,还以各种形式积蓄在岩体内,这种残余构造应力将对地下工程产生重大影响。

② 构造应力场在地壳浅部已普遍存在,而且最大构造应力的方向多近似为水平,其值常常大于自重应力场的水平应力分量,甚至也大于垂直应力分量。

③ 构造应力场很不均匀,其参数无论在空间上,还是在时间上都有很大变化,特别是其主应力方向和绝对值变化很大。

一、构造应力的分类

地质构造应力分为古构造应力、新构造应力和封闭应力三种。由于构造应力的存在,使原岩应力在空间上呈现不均匀性,在时间上也不是常数,并造成地层中垂直应力和水平应力之间无明显的比例关系。

1. 古构造应力

古构造应力是在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。

关于这种应力,目前还存在着极大分歧,因为有人根据应力松弛的观点,认为它已全部松弛而不存在了。从应力松弛的观点解释这个问题是明确的:如果岩石的松弛期大于从应力形成到现在的时间,则必然存在着残余构造应力;反之,如果岩石的松弛期或者岩体中某种岩石的松弛期小于从构造应力形成到现在的时间,则可以认为构造应力已松弛而消失(完全松弛),或部分松弛了(不完全松弛)。

2. 新构造应力

某些地层正在经受新构造运动的作用,在新构造运动中,引起地层升降、褶曲和断裂等现象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。

地震本身是新构造运动的一种表现,地球上绝大多数地震是由新构造断裂运动引起的。地震应力的特点是变化大,具有明显的时间性和突发性。在地震应力场中,常存在较大的水平应力。

3. 封闭应力

封闭应力是在各种地质因素长期作用下残存于结构内部的应力。但是对它的存在和解释还不一致。陈宗基教授认为:岩体中的各种颗粒,其刚度和温度系数各不相同,它们通过边界层接触,在历次构造运动中和温度应力场作用下,不断遭到复杂的加载和卸载过程。因此,岩体中存在极不均匀的应力场。在卸载过程中,由于各颗粒的力学特性不同,其卸载特性各异,即使外力全部卸除,内部仍然出现非均匀的应力场,原来的强应变区仍然会继续变



形。岩浆岩的冷却也会引起大的温度梯度,产生不均匀的内应力场。此外,在各种温度下,岩浆的物理化学变化也可能引起内部应力。由此可见,即使外力全部卸除,从局部结构来看,岩体结构里仍然存在着内能。这个能量在介质里是连续被封闭的,称为被封闭的能量。它是可以自我平衡的,称为封闭应力。

上述古构造应力、新构造应力和封闭应力在实际中很难区分。岩体生成以后,在各个不同的地质年代都有不同的地质构造运动发生。一般来说,地质构造运动需要很长的时间才能稳定。在同一地区,一个构造运动结束后,或者在这个运动发生的过程中又有新的构造运动发生。产生的新构造应力场与古构造应力场相互叠加,从而形成现今十分复杂的构造应力场。

二、地质力学的基本原理

研究地质构造应力的形成及其发展规律离不开地质力学。地质力学是以力学的观点和方法研究全球、区域或局部地质构造的一门科学。地质力学着重抓住地质构造史上遗留下来的“构造形迹”,如褶皱、断层及各类节理来反演过去地质构造的受力性状,并在总结规律的基础上推断或预测更大范围的地质构造情况。

地质力学认为,地球自转的角速度每隔若干年发生一次变化,从而引起转动惯量变化,造成东西向的巨大水平挤压力。该挤压力形成造山运动或地质构造运动,往往形成由一系列褶皱和断层组成的南北走向山脉或称为径向构造体系(图 1-5)。同时,地质力学还认为,地球为一南北轴较短的扁椭球,椭球的离心率每隔若干年也发生变化,从而引起南北向的巨大水平挤压力,这是形成东西向山脉或称为纬向构造体系的主要原因。

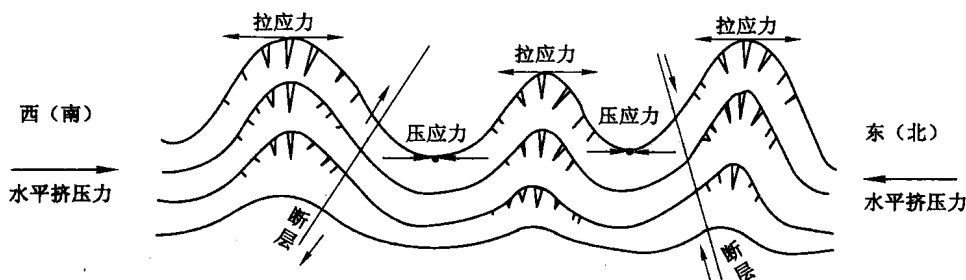


图 1-5 地质构造运动与地质形迹

显然,在地质构造运动活跃期间内,岩体的水平应力必然增大,可能超过自重应力引起的水平应力许多倍。在构造运动结束后,由于岩体应力松弛的结果,其构造应力将逐渐减小,甚至完全消失。

按照地质力学的基本观点,通过对较小范围地质力学因素的调查分析,对判断当地原岩应力的情况,尤其是原岩水平应力的作用方向,是很有帮助的。

设局部有一水平岩层,当所受到的水平挤压力由小到大增加时,就会变形隆起,形成褶皱(背斜或向斜)[图 1-6(a)]。一旦应力超过岩体的强度,便可能出现与最大主应力斜交的,因压剪破坏造成的“X 型节理”,还可能出现与最大主应力方向一致的因横向拉伸破坏造成的“纵张节理”,以及造成与最大主应力方向垂直的弯曲岩层受拉翼缘的“横张节理”。受力继续增加,则沿“X 型节理”可能造成平推断层[图 1-6(b)],相邻横张节理之间可能形成正断层[图 1-6(c)]或逆断层[图 1-6(d)]。

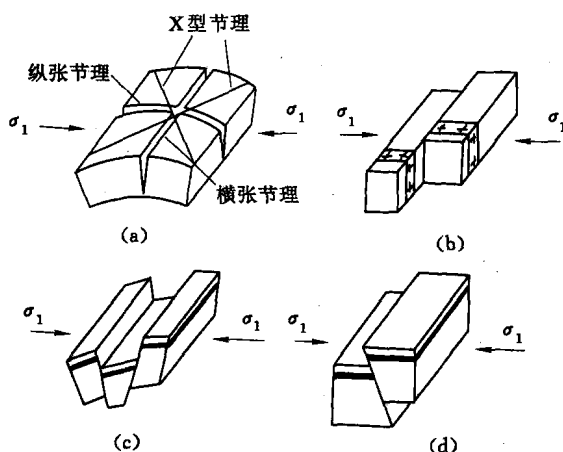


图 1-6 局部水平岩层在水平挤压力作用下的破裂情况
(a) 纵张节理、横张节理与 X 型节理; (b) 平推断层; (c) 正断层; (d) 逆断层

根据上述构造形成发展过程, 显而易见(图 1-7):

① 最大主应力方向与“X 型节理”斜交, 且按库仑准则, 最大主应力与每条斜节理交角皆为 $45^\circ - \varphi/2$, 故“X 型节理”的锐角平分线即为最大主应力方向;

② 最大主应力与纵张节理走向一致, 与横张节理走向垂直, 与正(或逆)断层走向垂直。

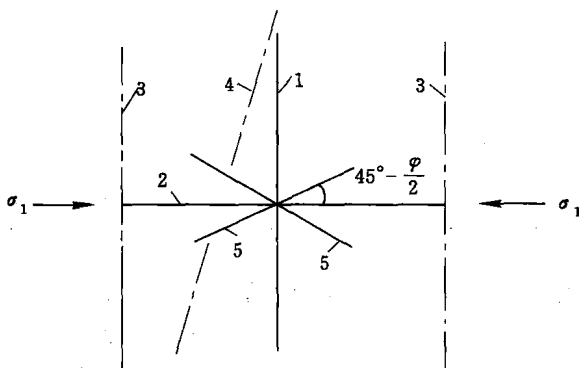


图 1-7 构造形迹与最大主应力方向的关系

1——横张节理; 2——纵张节理; 3——正(或逆)断层走向线; 4——平推断层走向线; 5——X 型节理

最后特别指出, 由于地质构造运动的历史十分复杂, 每次构造运动都要在原岩体内产生构造应力, 相互叠加、相互影响, 使构造应力场也十分复杂。而现实的原岩应力场又是由构造应力场和重力应力场等多种因素叠加而成, 所以迄今为止, 地质力学方法还难以成为确定原岩应力场的一种定量方法。

在某些重要工程中, 多采用实地测量的方法来判断主应力的方向及其方向的变化规律。在这些方法中, 比较通用的有地震法、水压破裂法、超前钻孔应力解除法、声发射法等。有关这部分内容可参考其他文献, 此处从略。



第四节 地壳浅部原岩应力变化规律

原岩应力受许多因素的影响,使得在概括原岩应力状态及其变化规律时遇到很大困难。不过从目前现有资料来看,3 000 m 以内地壳浅部原岩应力的变化规律大致可归纳为以下几点。

一、原岩应力场是一个非稳定应力场

岩体中原岩应力绝大部分是以水平应力为主的三向不等压空间应力场。三个主应力的方向和大小是随着时间和空间而变化的,是一个非稳定的应力场。

原岩应力的空间变化程度,就小范围而言,其大小和方向从一个地段到另一个地段发生变化,其偏差系数有时可达 25%~50%。但就某大地区范围而言,原岩应力的变化是不显著的。以华北地区为例,其原岩应力场的主导方向为北西向到近于东西向的压应力,但具体地区应力值有所变化,见表 1-1。

表 1-1 唐山地震期间应力变化表

地 点	测量时间	最大主应力方向		水平应力/MPa		最大剪应力/MPa
		地震前	地震后	σ_1	σ_2	$\tau_{\max} = (\sigma_1 - \sigma_2)/2$
唐山凤凰山	1976.10	近东西向	N47°W	2.5	1.7	0.4
三河弧山	1976.10		N69°W	2.1	0.5	0.8
怀柔坟头村	1976.11		N83°W	4.1	1.1	1.5
顺义吴雄寺	1971.06	N75°W		3.1	1.8	0.65
	1973.01	N73°W		2.6	0.4	1.1
	1976.09		N83°W	3.6	1.7	0.95
	1977.07		N75°W	2.7	2.1	0.3
滦县一号孔	1976.08		N84°W	5.8	3.0	1.4
滦县二号孔	1976.09		N89°W	6.6	3.2	1.7

原岩应力的方向和大小在时间上的变化,就人类工程活动所延续的时间而言是缓慢的,可以不予考虑。但在地震活动区,它的变化还是相当大的。以 1976 年 7 月 28 日唐山地区 7.8 级地震为例,顺义吴雄寺测点经过了一个应力积累到释放的过程。震前的 1971 年 6 月到 1973 年 1 月,最大剪应力 $\tau_{\max}$ 由 0.65 MPa 积累到 1.1 MPa;震后的 1976 年 9 月到 1977 年 7 月,最大剪应力 $\tau_{\max}$ 由 0.95 MPa 释放到 0.3 MPa,主应力方向也相应发生了变化。

二、实测垂直应力基本上等于上覆岩体自重

布朗、霍克(E. T. Brown, E. Hoek, 1978)将世界上一些国家的原岩应力实测结果汇成总图,如图 1-8 所示。其平均曲线为线性关系,通过回归分析得到如下关系:

$$\sigma_v = 0.027H \quad (1-12)$$

式中 H ——计算点到地表的垂直距离,m;

σ_v ——垂直原岩应力,MPa。

从我国的实测资料来看, $\sigma_v/\gamma H = 0.8 \sim 1.2$ 的仅占 5%左右; $\sigma_v/\gamma H < 0.8$ 的占 16%;而 $\sigma_v/\gamma H > 1.2$ 的占 79%,其中个别达到 2.0。这些资料大都是在 200 m 以内实测得到的,最深的



不超过 500 m。根据我国实测资料,好像无规律可循。陶振宇、于学馥、郑颖人、刘怀恒等人将我国实测资料填补到图 1-8 中,可见我国实测资料的分散程度不够,只是因为测点深度不大,密集在 origin 附近区域而已。因此,我国还应加强对原岩应力的实测和研究工作。

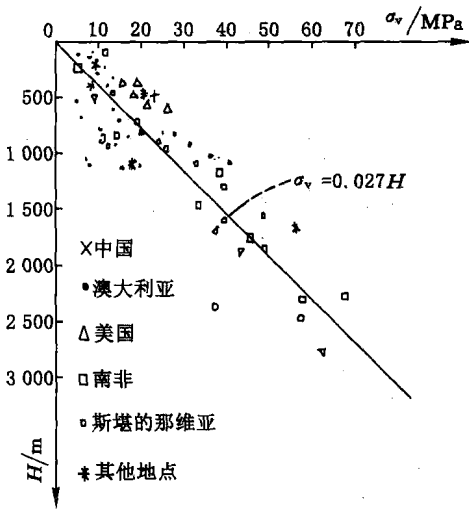


图 1-8 σ_v 与 H 的关系

三、水平应力普遍大于垂直应力

根据国内外实测资料统计,水平应力 σ_h 多数大于垂直应力 σ_v ,且两个水平应力也不相等。目前常用两个水平应力的平均值 $\sigma_{h,av}$ 与垂直应力 σ_v 的比值来表示侧压力系数。

$$\lambda = \sigma_{h,av} / \sigma_v \quad (1-13)$$

世界各国的实测资料表明,侧压力系数一般为 0.5~5.0,大多数为 0.8~1.5。我国实测资料表明,该值一般为 0.8~3.0,而大部分为 0.8~1.2(表 1-2)。这些资料说明:实际的原岩应力场与自重应力场情况不同,实测的 σ_v 多数为最小主应力,少数为最大主应力或中间主应力。

表 1-2 世界各国侧压力系数 λ 的统计百分率及最大值

国家或地区	$\lambda = \sigma_{h,av} / \sigma_v$			λ_{max}
	<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