

岩体断裂力学 理论与工程应用

●国家自然科学基金资助项目

唐辉明 晏同珍

著

中国地质大学出版社

岩体断裂力学理论与工程应用

(国家自然科学基金资助项目)

唐辉明 晏同珍 著

中国地质大学出版社

· (鄂) 新登字第 12 号 ·

内 容 提 要

全书共分五章。第一章绪论, 主要介绍岩体断裂力学的研究现状与前沿课题, 并分析岩体断裂力学的中心问题与研究方法。第二章介绍应力强度因子 (或断裂扩展力) 叠加、不连续位移数值分析、岩石复合断裂判据及位移、应力分析等基本原理。第三至第五章分别叙述实验室岩石断裂力学现象, 野外剪性断裂和节理形成机制以及工程岩体稳定性分析。

本书为岩体断裂力学专著, 可供工程地质、岩石力学、构造地质、探矿工程、地球物理及其它相关专业的科技人员参考, 也可供上述各专业高年级本科生和研究生参考。

© 岩体断裂力学理论与工程应用

唐辉明 晏同珍 著

出 版 中国地质大学出版社 (武汉市·喻家山·邮政编码 430074)

责任编辑 邓祥明 责任校对 徐润英 版面设计 阳沛

印 刷 中国地质大学印刷厂

发 行 湖北省新华书店经销

开本 787×1092 1/16 印张 6.625 字数 170 千字

1993 年 6 月第 1 版 1993 年 6 月第 1 次印刷 印数 1—1000 册

ISBN 7-5625-0745-7/P·260 定价 6.30 元

前 言

近二三十年以来,断裂力学的理论和方法被引进到岩石和岩体领域,随着理论和应用的不断发展与完善,已逐步开始形成岩体断裂力学这一新的分支学科。由于岩体断裂力学较传统岩体力学具有更多的优越性,因而适用性更广。近年来,岩体断裂力学已成为岩体力学最活跃的分支之一。显示出越来越广阔的发展前景。

在岩体断裂力学的发展初期,研究者的主要精力集中在岩石的室内试验与理论分析方面,并简单直观地推广至工程应用。无疑地,这方面的研究是十分重要的,但相比较而言,岩体作为地质体的断裂力学性质的研究则显得更加迫切,因为它与工程实践密切联系。如何解决好岩体断裂力学理论与工程地质研究脱节的问题是学科发展的关键之一。事实上,学科的新近突破也反映了这一点。

另一方面,宏观与微观的不断结合是学科发展的又一重要趋势。宏观岩体断裂力学与微观岩体断裂力学均有各自本身不可克服的缺陷,又有各自不同的适用范围。岩体统计断裂理论与损伤力学的发展及其与宏观岩体断裂力学的结合,将极大地拓宽人们的视野。

我们的研究思路正是基于以上两点,并力图工程实用。本书主要涉及岩体脆性断裂,作者试图将研究成果作一较为系统的总结,并将国内外有关成果加以评述或简介,以便成为完整的系统。我们的研究工作涉及野外断裂观察与统计、宏观与微观理论分析、实验室研究、计算机数值模拟及工程岩体稳定性和工程区域稳定性计算等方面。岩体断裂力学是一门年轻而不成熟的学科,对学科的建立、发展及其与工程地质研究的结合作出贡献正是我们不断追求的目标。我们的研究工作仍在不断深入,相信今后必将取得新的进展。

书中不妥之处,恳望指正。

作 者
1992年7月于武汉

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 岩体断裂力学的研究现状.....	(1)
第二节 岩体断裂力学的中心问题.....	(6)
第三节 岩体断裂力学研究对象的特点及其研究方法.....	(8)
第二章 岩体断裂力学的基本理论	(10)
第一节 基本原理	(10)
第二节 复合断裂判据	(14)
第三节 应力强度因子与断裂扩展力叠加原理	(18)
第四节 岩体断裂力学中的不连续位移数值方法	(21)
第三章 实验室岩石断裂现象研究	(24)
第一节 岩石变形破坏的过程与阶段	(24)
第二节 常规岩石力学实验中的初始断裂现象	(26)
第三节 岩石破坏前微断裂的扩展与后续断裂现象	(31)
第四节 压应力下斜向断裂扩展研究	(32)
第四章 节理与剪性断裂形成机制	(41)
第一节 野外脆性断裂分类	(42)
第二节 节理断裂力学机制	(49)
第三节 节理系扩展与相互作用研究	(56)
第四节 剪性断裂力学机制	(64)
第五节 孔隙液压作用下的断裂稳定性	(71)
第五章 断裂环境反演与岩体稳定性分析	(77)
第一节 地应力地震波断裂力学反演法	(77)
第二节 区域断裂活动性分析	(79)
第三节 水库诱发地震评判	(82)
第四节 工程岩体稳定性分析	(88)
第五节 水压破裂机制	(92)
主要参考文献	(95)

第一章 绪 论

岩体断裂力学是工程地质学与断裂力学交叉的边缘学科，属于岩体力学的分支。本章首先对岩体断裂力学的理论和应用研究状况作一综述；然后论述其研究中心问题；最后从岩体断裂特点出发，分析宏观与微观岩体断裂力学所适用的范围及其研究方法。

第一节 岩体断裂力学的研究现状

岩体断裂力学的产生首先是由断裂力学开始的，它的发展和不断成熟则与工程地质学密不可分。

现代工业中发生的严重的低应力脆性断裂事故是形成断裂力学的直接动力。许多理论计算表明，材料的抗拉强度约为其弹模 E 的 $1/10$ ，但由于裂纹和缺陷的存在，材料的实测抗拉强度只约为 $E/10^2$ 至 $E/10^3$ ，消除掉既有的裂纹和缺陷，会使材料的抗拉强度接近理论的估计值。很久以前，材料中既有的裂纹就已被认为是破坏的先兆，Inglis (1913) 最早通过报道椭圆孔周围的拉应力分布证实了这个假设。Griffith (1921) 最早提出了裂纹扩展导致材料破坏的条件，他从能量的角度得出了物体强度与材料性质及裂纹长度之间关系的表达式。在这之后，Sack (1946)、Wolf (1923) 及 Sneddon (1966) 又对 Griffith 的工作做了改进与推广。脆性断裂理论的又一突破是 Irwin (1957) 提出的应变能释放率 G 与应力强度因子 K 的概念以及随后断裂韧度 K_{Ic} 概念的形成、断裂韧度实验技术的建立，这样得到的 K 判据和 G 判据比 Griffith 判据及 Orowan (1949) 修正判据更为有效和通用。于是，作为断裂力学最初分支的线弹性断裂力学便建立起来。对大范围塑性材料，60 年代初，Dug-dale 提出了基于 D-M 模型的临界裂纹张开位移指标，即 COD 法，Rice (1968) 最早提出了 J 积分原理，这些都为弹塑性断裂力学的出现奠定了基础。

几十年来，断裂力学在工程领域的应用突飞猛进。断裂强度分析是断裂力学的最主要应用，其应用范围从开始的金属、陶瓷等已扩展至几乎所有的脆性材料。材料疲劳寿命的估算是线弹性断裂力学的又一发展，Paris 和 Erdogan (1968) 提出了著名的亚临界断裂扩展速率公式。Roberts 和 Wells (1954) 最早提出了脆性材料断裂扩展速率的表达式，Evans (1972) 等人又深入分析了应力腐蚀机理。同时，复合断裂判据问题也随着工程应用出现，最早提出的判据是能量释放率判据，这之后 Sih (1974, 1976) 提出了最大拉应力理论和应变能密度因子判据，其它经验判据也层出不穷。

脆性和半脆性岩体断裂是地壳表层广泛存在的地质构造，也是工程地质、探矿工程、构造地质及地球物理研究的对象。可是人们对脆性和半脆性岩体断裂的认识却远远落后于对塑性现象的理解，因而远不能满足地学研究和生产实际的需要。这一方面归因于地质体的复杂多变和地质边界条件的非确定性，另一方面则是因为脆性断裂证据常被地质过程的其它现象所掩盖。值得指出的是，长期以来，地质学家和岩石力学家都将主要精力集中于对塑性现象的研究，而对脆性断裂未予充分注意，也是造成这种现象的一个重要原因 (Poirrer, 1985)。

岩体脆性和半脆性断裂研究的重要进展是以 Price (1966) 论文“脆性和半脆性岩石中断层和节理的发展”为标志。在该文中,作者第一次将实验室研究与理论分析相结合,用以分析构造运动中的岩石脆性断裂现象。构造断裂与工程岩体断裂(即因工程作用而产生或发展的断裂)并无本质的不同,只是其形成的时代不同、扩展速率有差异并表现在外观上稍有区别而已,因此 Price 的研究具有很大的实际意义。

在很长的时期内,岩石断裂试验者均只热衷于“断裂强度”的经验观察,由于天然岩体中不同规模断裂或缺陷的存在,这方面的成果没有普遍的意义。在各种断裂试验中,人们虽然发现了许多重要的断裂现象,如粘滑、扩容及孔隙液压机理等,但均未能有效地扩展至岩体应力环境,而且也不能有效地预测工程岩体断裂或构造断裂发展过程。

岩石脆性断裂机制研究重要进展的标志是断裂力学理论和方法的引入。岩体断裂力学将岩体视为多裂隙系统,用断裂力学概念和断裂模式研究断裂过程,认为断裂的起始和扩展都是原有裂隙和缺陷的发展,并在此基础上发展了自己的一套理论和方法。理论和实践证明,较传统研究其具有极其明显的优越性,并已成功地用来解释一些构造断裂和工程岩体断裂机制,准确地解决工程实际问题(唐辉明, 1991a, 1992a)。可以认为,岩体断裂力学的不断成熟和应用是岩体力学近二三十年以来最重要的发展之一(Atkinson, 1987; 唐辉明, 1991b)。

一、实验室观察与理论研究

岩体断裂机理与判据的研究是从微观、细观和宏观三方面来进行的。由于专业的限制,目前的研究者大多仍然以实验室岩块试验工作为主,从岩石力学与工程地质相结合的野外研究尚不多见。但无疑地,实验室研究是揭示岩石破坏机理的重要手段,在岩石断裂力学研究中占有重要地位。

在实验室研究中,人们首先注意的是压应力环境下的断裂发展。由实验结果发现,对于许多岩石宏观主断裂发生在应力差达到极大值之后,在这之前岩石内产生许多微裂隙,且以张破裂为主,很少甚至没有剪切现象。而这些现象都不是能由 Coloumb-Mohr 提出的简单破裂机制所能解释的。于是出现了工程地质中称之为“压致张裂”的概念, Gramberg (1969) 称之为轴向劈开。Griffith (1921) 脆性断裂理论对此有较完满的解答,这就是岩石力学中普遍采用的 Griffith 判据。后来, Me Cclintock 和 Walsh (1959) 考虑了裂隙闭合后的摩擦效应,提出了修正的 Griffith 判据。事实上, Brace 和 Bombalkis (1963)、Hoek 和 Biniwski (1965) 通过实验研究正确地指出,在压应力作用下,宏观断裂破坏不是由单一预先存在的微裂隙扩展而形成,而是各微裂隙、颗粒边界及孔洞集聚的结果。Peng (1972) 等人得出了 Chelmsford 花岗岩在单轴应力作用下的微断裂发展过程;永广昌之等 (1974) 注意到微破裂的雁行式排列特点;Gramberg (1989) 注意到常规岩石试验中的断裂起始与扩展现象;Roberter (1979) 将微裂隙相互作用归结为雁行式、牵引式和裂纹-孔穴式三种基本类型;岩石颗粒应力的非均匀数学模型研究无疑将微观研究推进了一步(Dey 等, 1981);唐辉明等对砂岩、花岗岩在 Hoop 试验中不同应力区的断裂型式转化进行了深入的研究,这对比较不同性质微观断裂特征和发展过程很有意义(Tang Huiming, De Freitas 等, 1991);大量的断裂初度测试提供了不同岩性和结构、不同应力条件下断裂扩展的细节(Laqueche 等, 1986; Kobayashi 等, 1986)。此外, Batzle (1979)、Scholz (1968)、Lajtai (1974) 及 Bombolakis (1973) 等的有关微观研究也很有意义。

实验室研究中,人们通常将注意力集中于斜向贯穿断裂的“尾部效应”(即所谓“翼型断

震”的形成和发展),这实际上与早期 Griffith 模型类似,只是为了分析某些特殊问题而对实验条件作一些调整或改变而已。继 Brace 和 Bombolakis、Hoek 和 Bieniawski 的工作之后, Mallbauer (1973)、Tapponnier (1976)、Ingraffea (1979, 1978) 又取得了新的进展; Nemat-Nasser 等人 (1982) 注意到对非平面裂纹的研究,并将研究成果应用于岩爆等现象的分析; Fredrich 等人 (1990) 还研究了颗粒尺度对脆性、半脆性岩石强度的影响,并提出了压应力下的微力学模型。

在实验室岩石试验观察的基础上,人们还广泛采用数值模拟分析的方法研究断裂的扩展过程与扩展轨迹 (Nemat-nasser, 1982; Bombolakis, 1973; Ingraffea, 1979, 1981; Ingraffea 和 Heuze, 1980),这些都为理论分析工作提供了坚实的基础。理论分析工作以 Bieniawski (1967a, b)、Peng 和 Johnson (1972)、Adams 和 Sine (1976, 1978) 的成果最为完整和系统。至此,人们对压应力场下岩石斜向断裂的扩展有了较为成熟的认识。

在以上工作的基础上,岩石压扭-压剪断裂判据的研究也取得了进展,如周群力 (1985) 提出了实用性较广的经验判据,潘别桐和唐辉明 (1987) 也做过类似的研究。此外,岩石断裂韧度的室内外测试技术也日趋成熟 (陶振宇, 1984, 1991; 于晓中, 1984; 唐辉明, 1988)。

值得一提的是岩石应力腐蚀机理的研究。Wiederhorn (1966)、Speidel (1971)、Evans (1974) 及 Lawn (1975) 首先取得了一批实验成果; Anderson 等 (1977) 总结了以往岩石应力腐蚀的研究成果,归纳了应力强度因子与应力腐蚀裂纹扩展速率的关系式或图表。Atkinson (1979, 1980, 1982, 1984) 系统研究了应力腐蚀的物理化学过程,他的研究成果在其主编的岩石断裂力学专著中已比较系统地进行过总结 (Atkinson, 1987)。

二、岩体断裂现象与机理的研究

长期以来,人们最感兴趣的是对“岩石材料”的研究,对天然岩体的断裂现象缺乏应有的认识。目前,对这方面的研究起步不久,但发展很快,中国地质大学研究成果较多,并已形成较为完整的系统。

研究者首先必须对脆性断裂现象有足够的认识。人们在很早以前就注意到了许多难以解释的断裂现象,有时提出了一些错误的理论或观点,这些也已成为岩体断裂力学研究的极好素材。早在 1893 年,Woodworth 就注意到节理面上发育的羽饰构造;1937 年,Balk 和 Cloos 等又注意到火成岩体中的节理特征。但据作者所涉及的资料,只是到 1978 年 Bahat 才第一次将节理面构造与玻璃断口作了对比,认为其为典型的脆性断裂力学现象。同年,Mitra 发现矿物充填物作为节理起源的现象,并认为这具有普遍的意义。1982 年,作者也曾在山西平鲁县发现有数处典型的 I 型面 (节理面) 构造,认为这种构造是由一个或多个节理源为起点扩散而成。1979 年,Kulander 等发现化石作为节理面源点的现象,后来 Pollard 等 (1988) 又发现了完整典型的节理面构造,在这之前还发现了母断裂扩散成雁行式断裂的现象 (Pollard 等, 1982)。Bahat (1984)、Robin 等 (1985) 也做了许多有益的野外鉴别工作。1987 年,Degraff 等人对柱状节理的表面形态做了深入的观察与分析。作者在四川汉源、甘洛和石棉县境内发现大批典型的节理面构造 (I 型)、剪性断裂 (II、III 型)、混合型断裂及其起始、扩展和相互作用的大量野外证据和现象,同时指出,无论是断裂末梢的扩展,还是断裂面构造,均可看作为分形,羽饰构造实际上是分形和能量耗散的表现 (唐辉明, 1992b)。

从岩体断裂力学的角度认识野外断裂构造是学科极其重要的任务。Pollard (1988) 定义

节理为“野外以张开位移为主的断裂构造”，余者称为断层。他们认为从力学角度来看，节理与断层是绝对不同的，因为它们有各自不同的应力场、位移场和应变场。Engelder (1987) 则将节理以外的断裂构造统称为剪性断裂。唐辉明 (1991a) 则更明确地认为，节理即是 I 型断裂或以 I 型为主的断裂，剪性断裂是以 I 型或 II 型为主的断裂。事实上，这些定义与传统构造地质学并不矛盾，且具有严格的力学概念。

野外构造断裂与工程岩体断裂机制的研究是岩体断裂力学的最重要的研究课题。Segall 等 (1980) 对不连续断层 (即 I、II 型断裂或以 I、II 型断裂为主的断裂) 进行了断裂力学分析。其后，研究者的注意力又转移到对雁行式断裂构造的起始、扩展和相互作用的断裂力学机制的研究 (Pollard 等, 1982, 1984; 唐辉明, 1991b, 1992a; Olson 等 1991)。研究者还较深入地研究了平行断裂系的断裂力学机制 (Segall 等, 1983, 1984; 唐辉明, 1991b)。Kemeny 等 (1985) 分析了陡倾节理系的形成与稳定性。Aydin 等 (1990) 用边界单元法分析了雁行式轨迹走滑断层的相互作用。Lin 和 Parmentier (1988) 用边界单元法模拟了正断层的准静态扩展过程。Einstein 和 Dershowitz (1990) 对压应力场下张性和剪性断层作了详尽的总结，并与常用的 Mohr 圆分析方法对照说明了各种类型断裂可能表现的应力状态。

近年来开始的用分形理论对脆性断裂现象的研究也取得了不少进展 (谢和平, 1991; 唐辉明, 1992c)，这方面的研究可能会揭示出一些新的断裂规律。

由上述可见，目前岩体断裂机制的研究仍然是薄弱的，这方面将是今后研究的重要课题。

三、脆性统计断裂理论与损伤力学的研究

脆性统计断裂理论首先是从解释实验室现象开始的。Griffith-Irwin 理论 (宏观断裂力学)；较好地单一裂纹尺度效应问题，然而对强度分散性问题无能为力。事实上，材料破坏中单一裂纹的产生、扩展是一个理想化的过程，实际材料的破坏是随机分布的裂纹综合作用的结果，因而表现出实验中的离散性或非确定性。脆性统计断裂理论正是在这种背景下产生的。近年发展起来的损伤理论更从“平均化”力学的角度，对这一问题进行了有益的探讨。

1. 统计断裂理论

统计断裂理论的产生应当追溯到 Weibull (1939) 最弱环思想的提出和著名的 Weibull 公式。进一步地，Matthews (1976)、Evans (1978a, b)、Fisher (1947)、Batdort (1978a, b)、Jayatilak (1979) 和 Wang (1990) 都从不同的侧面对 Weibull 模型做了改进和扩展，并提出了各自的断裂强度分布规律或一定应力状态下的断裂概率。王宏和陶振宇 (1986, 1991) 的研究成果与岩石试验结果有较好的拟合，达到很高的研究水平；Scholz (1968a, b)、Mogi (1963) 等也作出了很好的研究成果。

统计断裂理论的难点是对天然岩体的应用。Scholz (1968c, d) 首先将统计断裂理论用于解释地震现象和震级-能量关系式，使人耳目一新。Vere-jones (1977) 则进一步发展了 Scholz 的设想，对震级-能量关系式从机制上作出了解释，他还提出了 Vere-jones 分枝过程模型。

对随机分布的断裂岩体统计断裂理论的探求是工程地质学家的重要任务之一。伍法权 (1991) 引用损伤力学中有效应力的概念，提出了断裂化岩体统计断裂力学新模型，无疑地，这种探索是极有意义的。目前，统计断裂理论用于估计岩体强度是可行的 (唐辉明, 1989a)，但应用于稳定性分析尚不成熟。看来，断裂化岩体统计断裂理论的完善与发展，是今后长期而艰巨的任务。

2. 损伤力学

损伤力学概念起源于材料蠕变断裂研究中的“连续性因子”和有效应力的概念,后来又引入了“损伤因子”的新名词。70年代后期,各国学者给损伤概念引入了物理意义和合理解释,把损伤因子推广为场变量,形成了连续损伤力学这门新学科。

把损伤力学应用于岩石材料最早见于 Dougill (1976)。Dragon (1979) 利用断裂面概念对岩石和混凝土的连续损伤进行了理论探讨。Krajcinovic (1983) 使用热力学和空穴运动学对脆性材料的损伤本构方程进行了较全面的研究。近几年, Kawamoto (1985)、Zhangwohua (1990)、Valliappan (1990) 和周维垣等 (1990) 又将其应用领域扩展到断裂化岩体,近来凌建明 (1991) 也在进行有关的研究工作。

研究损伤通常有两种处理方法:第一种是细观的处理方法,即根据材料微观成分的单独行为与相互作用来建立宏观的本构关系,如 Ashby 等 (1990) 的工作即属此类。这种方法的主要困难是以非均质的微观材料出发,需要经过许多假设来简化条件,过渡到均质的宏观材料。第二种是宏观的处理方法,它虽然需要微观模型的启发,但并不需要以微观机制来导出理论关系式, Kawamoto 等采用的张量法即属此类。

目前,断裂化岩体的损伤描述常以 Kawamoto 等的工作为基础,并发展了相应的有限元数值计算方法。但这种方法通常需要通过测量三个相互垂直的断面,才能确定损伤张量,实际岩体很难满足这种条件。如何建立适合工程实际的测量和分析方法是一个十分关键的问题,目前已有通过与结构面网络测量方法及岩体工程参数相结合建立损伤张量的尝试 (唐辉明, 1992c)。

总体看来,损伤力学在断裂化岩体中的运用尚存在一些问题,亟需大力开展这方面的研究工作。

四、岩体断裂力学的应用研究

岩体所含结构面本身是地质历史时期岩体破坏(断裂)的产物。这些结构面在条件改变或荷载作用下,还可能发生新的破坏(断裂)。岩体断裂的起始、扩展、终结与相互作用规律可以用于结构面发展趋势预测和岩体破坏失稳分析,因而可以评价工程岩体和区域岩体稳定性。

岩体断裂力学的应用研究已涉及地震力学和地震预报的许多方面 (Rice, 1979; Rudnicki, 1980; Das 和 Scholz, 1981; Crampin 等, 1984)。Li (1987) 从断裂力学角度描述了剪性断裂性质及其在地震研究中的应用; Pollard (1987) 对地震断裂形成机制作了分析,黄建安等 (1985) 也有类似的述评。唐辉明 (1991) 运用岩体断裂力学理论对四川瀑布沟地区区域活动性断裂稳定性进行了论证*。岩体断裂力学还对断裂分区、分带研究具有指导作用。

岩体断裂力学对于利用地震波资料分析区域平均剪应力很有效 (陈培善等, 1979), 在特定条件下还可求出区域平均主应力 (唐辉明, 1989b)。

水库诱发地震的实质是断裂在水作用下的失稳,从岩体断裂力学角度预测水库诱发地震的可能性及其震中和震级,是一个极有发展前途的方法 (周群力, 1982; 唐辉明, 1988, 1989c)**。

岩体断裂力学对于解释钻孔岩芯片状破裂机制很有效 (黄建安等, 1985); 水压应力测量的岩体断裂力学理论已形成严密的系统 (Rummel, 1987)。

* 唐辉明等, 1991, 四川大渡河瀑布沟水电站水库诱发地震预测工程地质研究报告, 中国地质大学水文工程地质系。

** 潘别桐、唐辉明, 1988, 河南沙河下汤水库诱发地震可能性工程地质研究报告, 中国地质大学水文工程地质系。

已经证明,岩体断裂力学十分适用于地下洞室围岩脆性断裂稳定性分析。Gramberg (1989)报道了某矿坑中大型 I 型断裂面的几何特征;黄建安(1985)也介绍了洞室围岩稳定性分析的思路。近来发展的不连续位移数值分析方法在地下洞室围岩稳定性分析中已得到成功的应用。Nemat-nasser (1982)还较好地分析了岩爆的断裂力学机制。

斜坡岩体稳定性分析中的滑坡源实质上就是失稳的断裂源(晏同珍,1980)。对于不连续滑移面,通过岩体断裂力学分析,可以得出不同点稳定程度分布,这种分析法对揭示斜坡岩体失稳机制很有意义(Scavia, 1991)。

作为工程基础的岩体,在工程荷载、岩体应力场等作用下,其中所含断裂可能发生扩展,这种扩展可能使岩体产生滑移、开裂、变形或渗漏,直接或间接危及工程的安全。岩体和坝体接触面裂隙的扩展就是一个典型的断裂力学问题(周群力,1979)。

岩体统计断裂理论和损伤力学是估算随机分布断裂岩体强度的有力工具,近来又有岩体稳定性分析的尝试。随着理论的不断成熟,这种分析方法必定能直接应用于工程实际。

岩体断裂力学在地球物理方面的应用也日趋广泛。如在洋岭抬升、岩浆侵入、地壳岩体的抬升与侵蚀、热能提取、冰隙扩展、冰川运动及断裂岩体液体运移分析等方面都有成功的应用。

第二节 岩体断裂力学的中心问题

50年代以来,岩体力学的理论和方法得到了很大的发展,对此,奥地利学派占据了相当重要的地位。奥地利学派的基本观点是:①就大多数工程而言,岩体的工程性质取决于岩体内部地质断裂系统的要比岩石本身强度的大得多。所以岩石力学是一种不连续体力学,即裂隙介质力学;②岩体的强度是一种剩余强度。此剩余强度和它的各向异性都受代表着岩体的各单元岩块之间的相互联结所制约;③岩体的变形性质和它的各向异性主要是由岩体结构中的单元岩块间的内部位移所造成的。

显然,奥地利学派的重要贡献就在于认识了裂隙系统在岩体介质性质中的作用,因而该学派被称作为地质学派。岩体的变形与破坏与结构面密切相关已成为普遍的共识,但这并不意味着岩体中发生的所有破坏都是完全沿着原有结构面的滑移或张开。岩体的破坏可以完全沿着原有的结构面;也可以部分沿着原有的结构面并产生新的断裂面;特殊情况下甚至在岩块中产生全部的新断裂面。但毫无疑问地,所有的岩体破坏都是与原有的结构面有关的,岩体断裂力学的研究成果反复地证明了这一点。

岩体具体的破坏或滑移方式是受很多因素制约的复杂过程,对这种规律的研究是岩体力学的根本任务。孙广忠(1988)所倡导的岩体结构力学正是这方面的有益追求。岩体的破坏实质上是在岩性、结构(断裂或裂隙)和环境三要素控制下的断裂再扩展过程,因此,它涉及许多复杂的因素,不是某一简单的力学计算就能完全阐述清楚的。图1-1是对岩体力学工作的简单汇总,可见岩体力学是一个综合性很强的工作,而结构面的研究占据了相当重要的地位。

断裂力学认为,断裂的扩展都是发生在原始断裂或缺陷的基础上,这正是岩体断裂力学较传统研究的优越性所在。岩体是贮存于地应力等环境中的复杂断裂系统与岩块的组合,其断裂网络是在不同地质历史时期形成的,具有不同力学性质和裂面特性的破裂构造。用岩体断裂力学的理论与方法正确地认识这些断裂系统,乃是岩体断裂力学的基本研究课题之一。在

此基础上，探索断裂系统与岩块组成的岩体（地质体）的破坏规律应当成为岩体断裂力学研究的重点。这种研究不仅仅局限于宏观的层次，也应当包括细观与微观的层次。广义岩体断裂力学是包括宏观、细观和微观岩体断裂力学的有机整体。

工程地质 信息收集	地质模 型抽象	岩体力学 模型抽象	数学力学 模型建立	岩体力学 分析	地质工程 设计	地质工程 施工
-岩体 -结构面 -赋存环境 条件 地应力 地下水 地温 地震 -岩体力学 性质	↓ 依据岩 体结构 特征	-岩体变形 与破坏 机制 -地质环境 因素 -工程作用 条件 -岩体改造 方案	-变形本构 方程 -破坏判据 -环境因素 模型 -工程活动 动态 -岩体改造 方案	-岩体力学 性质 -工程活动 参数 -环境参数 -岩体改造 参数	-工程设计 要求 -岩体改造 技术经济 -施工要求	-施工技术 控制 -变形监测 -岩体力学 参数反分析 -修改设计 或 -修改设计 改造方案

图 1-1 岩体力学工作程序略图
(据孙广忠, 1988 修改)

我们认为，岩体断裂力学的中心问题是岩体断裂机制研究，即岩体断裂力学研究岩体断裂起始、扩展、终结、相互作用及其与环境之间的关系。一方面，这种研究可以解释传统理论所一直不能解释的现象，并揭示新的规律或现象，对于深化对工程动力地质现象和岩体力学问题的理解、拓宽解决工程实际问题的思路具有重要的意义；另一方面，研究成果可以直接用作解决工程实际问题，因为这些问题本质上即为断裂起始、扩展、终结和相互作用的过程。岩体断裂力学研究与应用的成果充分体现了这一点。

岩体断裂机制远不是“岩石”力学所能揭示清楚的，因为岩石只是一种地质材料，而岩体是经受过变形和破坏的地质体。岩体力学工作的第一步必须是对岩体地质体的反复探讨与认识，那种认为室内岩块力学试验加上野外试验就能阐明岩体断裂机制的看法是不正确的。岩体断裂力学必须依据野外调查提出问题、提供边界条件和地质模型，并用野外调查验证问题答案的正确性。还应当看到，工程地质工作本身就是解决工程问题的极其重要的手段，长期以来，由于断裂力学研究与工程地质的脱节，一些工程问题的论证只是单纯地依据了室内岩块实验与直观理解，因而与岩体真实机制相差甚远。如何用“岩体”的观点去探讨岩体断裂力学的中心问题是学科长期而艰巨的任务。

必须指出，岩体力学问题复杂多变并涉及许多课题的各个方面，岩体变形破坏也不存在某一固定不变的模式。这是因为岩体结构是非常复杂的，工程类型又是多种多样的，特别是同一种结构的岩体由于赋存条件不同、工程作用类型不同、工程规模不同，可能构成的力学模型也很不同。因此，解决岩体力学问题的方法不应是唯一的，某一类方法也不可能永远是

最好的,各个分支学科有各自的应用范围和优缺点。不应认为岩体断裂力学是解决工程问题的唯一的或万能的手段,它不排除与其它分支学科的相互渗透和取长补短。但无疑地,岩体断裂力学是岩体力学重要的有机组成部分。

第三节 岩体断裂力学研究

对象的特点及其研究方法

天然岩体是在地质历史时期形成的地质体,它不仅表现出岩性的复杂多变,更表现在结构面的力学性质、几何形态、活动期次和交切关系等方面的千差万别。对断裂构造的切割密度与方式、构造序次、活动期次、胶结程度、延伸状况及微观特征等方面的研究是岩体断裂力学工作的基础。

工程区域稳定性(如地震、水库诱发地震及活断层问题等)研究所涉及的岩体稳定往往由一条或数条区域性断裂所控制。这时我们必须忽略三、四级序次的断裂构造、甚至一些具有一定规模的断裂,因为它们对区域稳定性不起作用或作用甚微。有时工程活动所涉及的局部岩体仅仅由比较稀疏的断裂构造所控制,或者在一定范围内的岩体中仅有较少期次构造活动产生的断裂分布,工程岩体稳定性常常取决于这些断裂的稳定性(不仅仅局限于沿断裂本身的滑移或张开)。对于这些类型的岩体稳定性问题,宏观岩体断裂力学的分析方法是行之有效的。显然此时岩体统计断裂理论和损伤力学是不适用的,因为岩体中断裂的分布不具有均匀随机分布的特点。

工程岩体有时由具随机分布的断裂强烈切割,宏观岩体断裂力学对此已无能为力,岩体统计断裂理论的损伤力学是解决这类工程岩体稳定性问题的有力工具。对完整岩体稳定性问题实际上已蜕化为类似岩块的情形,岩石统计断裂理论与损伤力学在这方面已积累了较多的成功经验。

对于由较少组断裂(具随机分布)切割的岩体,宏观岩体断裂力学、统计断裂理论及损伤力学均有不少成功运用的实例。如基于宏观岩体断裂力学应力强度因子或断裂扩展力叠加原理,采用数值计算方法已成功地解决了许多断裂岩体稳定性问题,对一些常见组合断裂系统已形成了较严格的解答。看来,宏观岩体断裂力学与统计断裂理论、损伤力学的对比分析是今后值得重视的工作。

岩体的力学属性在很大程度上取决于断裂的尺度效应,所考虑的工程岩体范围不同,岩体性质会发生变化。在图1-2所示的岩体中,随着工程尺度的变化,岩体可由完整岩石经一组、二组和数组断裂切割,过渡至完全断裂化岩体,因而其所适用的岩体断裂力学分支也就不一样。如果不考虑尺度效应,错误地使用分析方法,就会得出错误的结论。

尽管不同类型岩体所适用的岩体断裂力学分支有所不同,但这并不意味着各自研究方法的相互对立。事实上,宏观、细观和微观相结合的研究方法代表了岩体断裂力学的发展方向。

宏观、细观或微观岩体断裂力学各自本身都存在有缺点(尹双增,1985)。如宏观岩体断裂的扩展轨迹看作为平坦状的,而实际上该轨通常是呈“Z”字形,大“Z”字型套小“Z”字形,这样实际的断裂表面积就比宏观度量的要大,因而断裂临界扩展力也比宏观岩体断裂力学计算的要大。近来发展起来的脆性断裂分形研究能够更精确地描述断裂几何特征及断裂扩展的细节,因而是宏观断裂力学的不可缺少的补充。再如,损伤力学需要通过微观模型来建

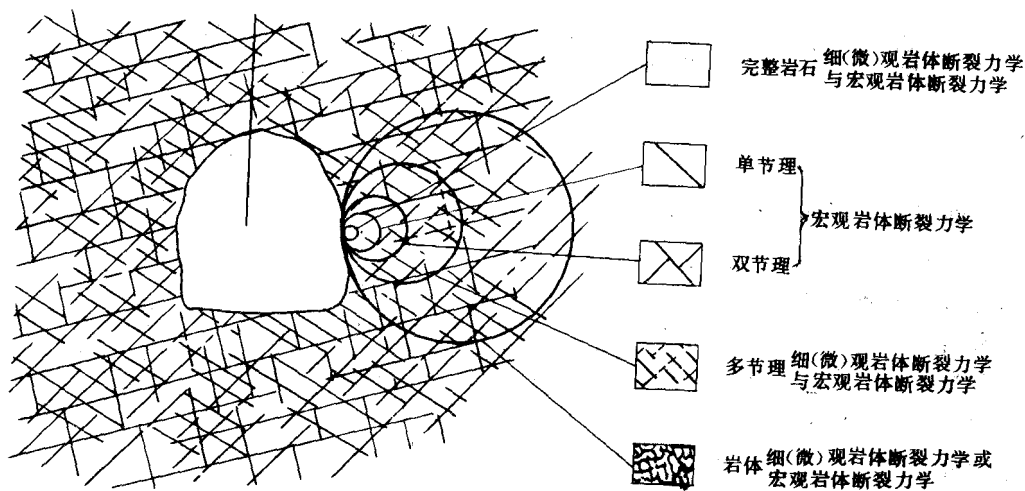


图 1-2 岩体性质随工程尺度的变化
(据 E. Hoek 和 E. T. Brown, 1980 补充)

立本构关系，这通常是十分困难的，有时是不可能的，因而有时不得不作适当的假设和简化，并采用宏观“平均化”的处理方法。显然，宏观、细观及微观的结合是十分重要的。

与岩体力学的其它分支一样，岩体断裂力学的发展必须建立在有关基础课题研究的基础上。岩体结构面发育规律是必须重视的首要问题，对此必须加强工程地质学和构造地质学的基础研究。近来广泛采用的岩体结构面网络测量方法与分析理论对这一问题的研究很有帮助。岩体结构面力学效应的研究也是岩体断裂力学所侧重的方面，对此必须十分重视室内和野外模拟试验工作。岩体断裂力学试验与一般试验的侧重与分析思路有一定差别，如何相互取长补短、充分利用现有资料很值得重视。岩体断裂力学如何考虑结构面起伏效应并与岩体质量参数挂钩，仍然是一个难题。

近来，弹塑性岩体断裂力学已能初步考虑与时间有关的岩体变形与破坏问题，并用于地震机理分析与地震预测 (Li, 1987)，但这方面的成果仍然不够深入。流变断裂力学的建立已初具萌芽，可望得到迅猛的发展 (袁龙蔚, 1984)。

地温、地压及液体对岩体断裂的作用仍然有待进一步研究，一定深度以下断裂的扩展机制在很大程度上仍然是一个谜。例如水库诱发地震的分析与预测尚不能细致地考虑水压的问题，故有关计算实际上远没有达到定量的程度。

岩体断裂力学的室内外试验、野外工程地质工作、数值模拟与解析工作是相辅相成、缺一不可的，学科的发展需要力学与工程地质学的紧密结合。

第二章 岩体断裂力学的基本理论

岩体断裂力学研究岩体断裂起始、扩展、相互作用的机制与断裂力学条件,因而实质上是研究岩体的强度特性,因为断裂的起始、扩展、相互作用和终结代表了岩体断裂的形成发育与岩体失稳破坏的过程。

研究岩体的强度经历了由连续介质理论到非连续介质理论的过程。传统的力学方法假定材料均匀连续,不存在任何内部断裂或缺陷,强度校核的通常思路是,首先计算出构件最危险区域的应力,乘以安全系数,若该值小于屈服强度或极限强度,则认为该构件是安全的,反之则是不安全的。在这种计算中,构件中可能存在的缺陷等因素是放在安全系数中加以考虑的。但近几十年来,由于高强度材料的不断出现,不断产生严重的破坏事故,后来经过大量的观察发现,这些事故都是在一般连续介质强度理论的安全范围以内发生的,即表现为低应力脆性断裂。研究表明,这种破坏都是由于宏观缺陷或裂纹的失稳扩展而引起的,从而形成了断裂力学。断裂力学不但继承了连续介质力学理论,而且发展了这些理论,认为低应力脆性破坏是由于材料或构件内部缺陷或裂纹引起应力集中而引起的,从而提供了一个防止断裂与破坏的理论,丰富了以前的强度理论。将断裂力学的理论和方法引入岩体领域,并加以丰富和发展,于是形成了岩体断裂力学的分支学科。

工程岩体多处于常温、常压的环境中,因此岩体断裂力学以研究脆性断裂为主。岩体是在漫长地质历史时期形成的贮存于复杂地质环境中的地质体,从工程地质角度研究岩体断裂力学性质及其稳定性是岩体断裂力学的重要基础与有机组成部分。

第一节 基本原理

岩体断裂包括地质历史时期的构造断裂与工程活动所新产生或重新扩展的断裂,后者可称为“工程断裂”。构造断裂和工程断裂形成的时期不同,形成时的扩展速率一般也不相同,因而表现在外貌上也有一定的差异。但它们形成与发展的本质并没有什么不同,都是岩体在应力作用下的破坏产物。因此,我们将两者统称为断裂。

一、断裂的位移型式

断裂扩展有三种基本方式或类型(图 2-1): I 型(张开型)、II 型(滑移型)和 III 型(撕裂型)。三种断裂类型的组合称为复合型断裂。

在直角坐标系 $y=0$ 的平面中(图 2-2):

$$\sigma_x \neq 0, \sigma_y \neq 0, \tau_{xy} = 0 \quad (\text{I 型})$$

$$\tau_{xy} \neq 0, \sigma_y = 0 \quad (\text{II 型})$$

$$\tau_{yx} \neq 0, \sigma_y = 0, \tau_{xy} = 0 \quad (\text{III 型})$$

在最普遍的情况下,断裂面可以是空间曲面,断裂前缘可以是空间曲线。但在实际工程问题中常遇见的是平面断裂,或可按平面断裂处理。

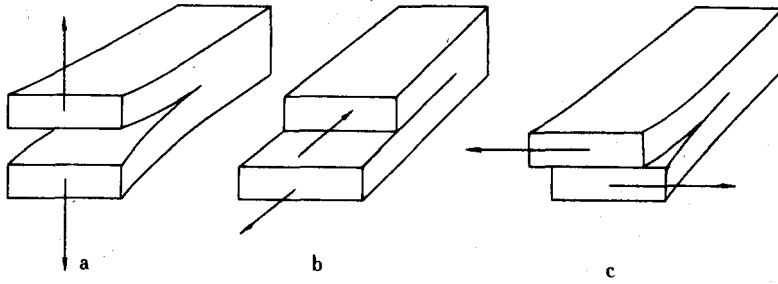


图 2-1 断裂的三种基本型式

a. I型(张开型); b. II型(滑移型); c. III型(撕裂型)

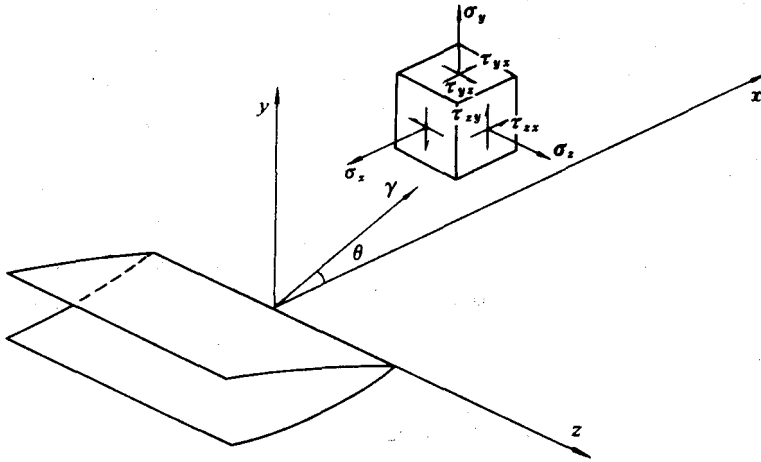


图 2-2 断裂尖端应力场坐标系

二、断裂尖端应力分析

建立在线弹性理论基础上的线弹性断裂力学，假定在断裂尖端塑性区与断裂长度及试样宽度相比非常小，把材料当作完全弹性体，运用弹性理论来研究断裂尖端附近的应力特征。

图 2-2 显示出了断裂尖端的应力分量。在各向同性、线弹性条件下，断裂尖端附近的应力值与 $r^{-\frac{1}{2}}$ 成正比 (r 是距断裂尖端的距离)。由 $r^{-\frac{1}{2}}$ 乘以某一常数的参数称为应力强度因子 K ，其数值大小取决于荷载的型式与数值、物体的形状及断裂的长度等因素。因而 K 是描述特定型式尖端应力场数值的参数。

如在图 2-2 所示的圆柱状坐标系 r, θ, z 中，I 型断裂尖端的应力由下式确定：

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}\right) \\ \sigma_y &= \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}\right) \\ \tau_{xy} &= \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \end{aligned} \right\} \quad (2-1)$$

I 型应力强度因子 K 值可定义为

$$K_I = \lim_{r, \theta \rightarrow 0} [\sigma_y (2\pi r)^{1/2}] \quad (2-2)$$

类似地, 分别用 τ_{xy} 和 τ_{yz} 代替式 (2-2) 中的 σ_y , 可得到 I 型和 III 型应力强度因子 K_I 、 K_{III} , 从而任一型式断裂尖端附近的应力可表示为

$$\sigma_{ij} = K_L (2\pi r)^{-1/2} f_{ij}(\theta) \quad (L = I, II, III) \quad (2-3)$$

其中 $f_{ij}(\theta)$ 是 θ 的函数。

当沿 z 轴方向的应力或位移不发生变化时, 即为平面应力 (应变) 状态, 此时应力强度因子可表示为

$$K = Y \sigma_r (\pi C)^{1/2} \quad (2-4)$$

式中: σ_r 为远场应力 (压为负, 拉为正); Y 为与断裂几何特征、加载条件和边界效应有关的系数; C 为半断裂长。

这样, 物体的断裂判据是:

$$K_L \geq K_{LC} \quad (L = I, II, III) \quad (2-5)$$

这里 K_{LC} 是应力强度因子的临界值, 称为物体的断裂韧性, 其数值与温度、变形速度及物体的性质有关, 不随几何形状而变化。它反映了物体抵抗内部断裂临界失稳扩展的能力。

三、断裂扩展力

在断裂力学中, 除了可通过考虑断裂尖端应力场判别断裂稳定性外, 还可通过断裂扩展力 G 加以判定。 G 也称为应变能释放率。 G 可以理解为断裂每扩展单位面积, 弹性系统所提供的能量, 其单位为 J/m^2 , 也可视为 N/m , 即理解为断裂每扩展单位长度时所需的力。

对图 2-1 的三种断裂形式, 在平面应变状态下分别有

$$\left. \begin{aligned} G_I &= K_I^2 (1 - \nu^2) / E \\ G_{II} &= K_{II}^2 (1 - \nu^2) / E \\ G_{III} &= K_{III}^2 / 2K = K_{III}^2 (1 + \nu) / E \end{aligned} \right\} \quad (2-6)$$

式中: ν 为泊松比; E 为杨氏模量; K 为剪切模量。对平面应力状态, G_I 和 G_{II} 表达式中的 $(1 - \nu^2)$ 用 1 代替即可。

脆性物体断裂失稳扩展的判据为

$$G_L \geq G_{LC} \quad (L = I, II, III) \quad (2-7)$$

这里 G_{LC} 称为临界断裂扩展力。

四、 J 积分与 COD

当物体中有大范围屈服时, 式 (2-5) 和 (2-7) 所表示的判据便不适用了。这时可采用 COD 和 J_c 准则。

在图 2-2 所示的断裂系统中, J 积分定义为