

著作出版专项基金

湖南省自然科学基金项目(10JJ3007)

湖南省优秀博士学位论文获奖作者科研资助项目(YB2011B040)

湖南省教育厅一般项目(11C0539) 资助

裂隙岩体渗流—损伤—断裂 耦合理论及工程应用

Liexi Yanti Shenliu-Sunshang-Duanlie Ouhe Lilun Ji Gongcheng Yingyong

赵延林 曹 平 王卫军 著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

湖南科技大学学术著作出版专项基金

湖南省自然科学基金项目(10JJ3007)

湖南省优秀博士学位论文获奖作者科研资助项目(YB2011B040)

湖南省教育厅一般项目(11C0539) 资助

裂隙岩体渗流—损伤—断裂 耦合理论及工程应用

赵延林 曹 平 王卫军 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书详细介绍了裂隙岩体渗流—损伤—断裂耦合理论及其在相关工程领域的应用。主要内容包括：渗流—应力作用下裂隙岩体断裂力学特性研究、类岩材料多裂纹体断裂破坏实验与岩石断裂韧度测试、裂隙岩体渗流—损伤—断裂耦合本构模型研究、基于双重介质裂隙岩体渗流—损伤—断裂耦合模型有限元分析、裂隙岩体渗流—损伤—断裂耦合的扩展 FLAC^{3D} 分析、高压预注水致裂软化煤层的工业试验和数值研究。

本书可供从事采矿工程、地下工程、水利水电、水文地质工程等与岩石力学、岩体力学相关的高等学校教师及研究生、研究院所的研究人员和设计部门的设计人员参考,也可作为相关研究方向的研究生教材。

图书在版编目(CIP)数据

裂隙岩体渗流—损伤—断裂耦合理论及工程应用/
赵延林,曹平,王卫军著. —徐州:中国矿业大学出版社,2012.5

ISBN 978 - 7 - 5646 - 1109 - 5

I. ①裂… II. ①赵… ②曹… ③王… III. ①水库蓄水—岩石力学;渗流力学 IV. ①TV697.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 130196 号

书 名 裂隙岩体渗流—损伤—断裂耦合理论及工程应用
著 者 赵延林 曹 平 王卫军
责任编辑 王美柱
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)
营销热线 (0516)83885307 83884995
出版服务 (0516)83885767 83884920
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com
印 刷 江苏徐州新华印刷厂
开 本 787×960 1/16 印张 14.5 字数 276 千字
版次印次 2012 年 5 月第 1 版 2012 年 5 月第 1 次印刷
定 价 42.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

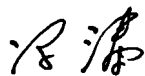
序

我用较长时间阅读了赵延林博士等人的学术专著《裂隙岩体渗流—损伤—断裂耦合理论及工程应用》的书稿,深感这是一本经过作者长期科学研究而精心完成的佳作,实在难能可贵。

裂隙岩体的流—固耦合理论及断裂损伤机理,一直是岩石力学研究领域的前沿方向。作者从实验研究、理论分析和数值模拟多方面对裂隙岩体渗流—损伤—断裂之间的耦合机理进行了深入系统研究,提出了高水压—应力作用下岩石翼形裂纹扩展的理论模型和数值模型,基于断裂损伤力学和渗流力学构建了岩体渗流—损伤—断裂耦合本构模型并开发了相关计算软件,把理论应用于解决采矿、水利等诸多工程中的岩石力学问题,揭示了岩体水力劈裂、矿井突水和高压注水中岩体渗流—损伤—断裂耦合响应规律。

作者多年来一直从事裂隙岩体多场耦合理论和工程响应研究,主持和参与了多个相关研究领域的科研项目,在岩体流—固耦合理论研究方面颇有建树,其岩石力学理论功底扎实,撰写了一系列具有较高水平的学术论文。赵延林博士的学位论文获得了湖南省优秀博士学位论文。本书作为他在该学科的处女作,既是他多年的潜心研究成果的总结,也是一部在岩石力学研究领域富有学术内涵和工程实用价值的佳作。相信该著作的出版有助于这一领域的进一步研究。

欣贺著作付梓,是为序。



二〇一二年四月

前 言

裂隙岩体的流—固耦合特性及断裂损伤作用机理一直是岩石力学领域的前沿研究方向。本书研究了渗透压作用下裂隙岩体断裂力学特性,采用断裂损伤力学理论研究渗流—应力共同作用下裂隙岩体的损伤变形和断裂破坏,从实验研究、理论分析和数值模拟多方面对裂隙岩体渗流—损伤—断裂之间的耦合机理进行了深入系统研究,重点研究渗透压对裂隙岩体宏观结构的改造作用及其宏观损伤力学响应。

本书提出了高水压—应力作用下岩石翼形裂纹扩展的理论模型和数值模型,揭示了岩体水力劈裂的细观机理;开展了类岩材料多裂纹体断裂破坏实验与岩石断裂韧度测试;建立了高水压—应力作用下岩体裂纹相互作用及扩展、贯通的力学模型和岩体渗流—损伤—断裂耦合本构模型;开发了含水裂隙岩体的非线性损伤变形、强度预测和渗透系数演化的计算软件与双重介质渗流—损伤—断裂耦合模型的有限元程序,从细观力学的层次上解释了宏观岩体渗流—损伤—断裂耦合作用下的破坏、失稳行为;通过 FISH 语言,在 FLAC^{3D} 平台下二次开发了裂隙岩体渗流—损伤—断裂耦合的 FLAC^{3D} 计算模块。

在工程应用方面,本书将裂隙岩体渗流—损伤—断裂耦合理论应用于水库蓄水裂隙岸坡的稳定性分析、不衬砌压力隧洞工程、矿井岩溶突水机理、高压预注水致裂软化煤层,从流—固耦合的角度揭示了水库蓄水裂隙岸坡失稳、不衬砌压力隧洞工程水力劈裂、矿井岩溶突水、高压预注水致裂软化煤层的渗流—损伤—断裂耦合机理。

本书是在湖南科技大学学术著作出版专项基金、湖南省高校科技创新团队支持计划资助下完成的,并得到了国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2007CB209400)、湖南省自然科学基金项目(10JJ3007)、湖南省优

秀博士学位论文获奖作者科研资助项目(YB2011B040)和湖南省教育厅一般项目(11C0539)的资助。

由于作者水平所限,书中难免存在错误和不妥之处,恳请专家、读者不吝批评和赐教。

著 者

2012 年 3 月

第一章 绪 论

第一节 裂隙岩体渗流—损伤—断裂耦合研究的重要意义

裂隙岩体富含各种缺陷,包括微裂纹、孔隙以及节理裂隙等宏观非连续面,它们的存在为地下水提供了贮存和运移的场所。地下水渗流还以渗透应力作用于岩体,影响岩体中应力场的分布,同时岩体应力场的改变往往使裂隙产生变形,影响裂隙的渗透性能,所以渗流场随着裂隙渗透性的变化而重新分布,这种相互影响关系称为渗流—应力耦合。1959年,法国 Malpasset 拱坝在初次蓄水时即发生了全坝溃决,这是典型渗流—应力耦合作用所造成的工程事故例子。从 Malpasset 拱坝溃坝事件开始,人们认识到从基础理论和工程应用两方面研究渗流—应力耦合作用是十分重要和具意义深远的。岩体的渗透特性和水力耦合作用是近年研究的热点问题,随着人类工程活动范围的扩展和规模的扩大,对这一需求显得尤为紧迫。无论水电工程、采矿工程、建筑基础工程,都存在人类工程干扰力、岩体地应力、地下水渗透力之间相互影响、相互作用和耦合作用问题。据统计,90%以上的岩体边坡破坏和地下水渗透力有关,60%的矿井事故与地下水作用有关,30%~40%的水电工程大坝失事是由渗透作用引起的。此外,地下水抽放、油气开采、水库诱发地震、地表沉降、地下核废料存储等都涉及岩体作用力、岩体地应力、地下水渗透力的相互作用及其耦合问题。可见,该课题是一项具有理论研究价值和实际工程应用背景的重大课题。

岩体是由岩石块体和非连续节理(裂隙)组成的地质结构体。在地质环境和工程扰动作用下相邻节理(裂纹)扩展和相互贯通是工程岩体的主要破坏方式。比如在隧道和地下硐室的开挖过程中应力场的重新分布会诱发损伤,并演化成宏观裂隙。这种损伤将有可能导致岩体渗透性的剧烈变化,水将会渗入隧洞中。随着人们对渗流—应力耦合问题认识程度的加深,逐渐认识到损伤破坏、裂纹扩展对岩体渗流—应力耦合作用影响十分显著,主要表现为:

① 损伤断裂对渗流过程的影响:即微裂纹萌生、连接、扩展和贯通过程中渗透率演化规律及其力学机制问题。由于扩展中的裂纹的渗流特性与原生节理的

渗流特性有着明显的差异,因此必须同时考虑原生缺陷和损伤演化对岩体渗透张量的影响而导致的渗流场空间变化。

② 渗流—应力共同作用下诱发的岩体损伤过程:工程范围的裂隙岩体渗流—应力共同作用下,将促使裂纹发生劈裂、扩展、贯通等损伤行为,导致岩体局部损伤演化,强度降低。这种岩体损伤演化过程是在工程载荷受到扰动后产生的,如渗流场的改变、开挖卸载等。

裂隙水压促使裂隙张开度增加,加剧岩体裂隙的起裂、扩展、贯通,导致岩体渐进失稳破坏,在宏观上,这一过程是渗流导致岩体强度渐进劣化损伤的过程即渗流损伤,同时岩体应力的改变和岩体裂隙的损伤扩展,导致裂隙岩体的渗透特性变化,将改变渗流场的分布。岩体应力的损伤演化与渗流之间的作用是相互耦合的。

从裂隙岩体的角度来讲,岩体孔隙、裂隙的发育对岩体力学性能的影响称为初始损伤,应力状态下的岩体破裂与失稳称为损伤演化。无论是初始损伤还是损伤演化,均改变岩体裂隙结构及其渗透特性。而渗流对岩体的力学作用,即是水压力促使裂纹扩展和诱发岩体损伤演化。从国内外对岩体断裂损伤的研究现状来看,主要集中在初始损伤特性和应力—应变状态下裂隙岩体损伤演化两方面,而对于裂隙岩体在渗流场环境中渗透压作用下岩体裂隙的变形、扩展、贯通规律和岩体的损伤演化的研究甚少。从大量的岩体工程发现:裂隙岩体渗流—损伤—断裂之间强耦合效应是普遍存在的。J. A. Wang 等(2002)认为岩层底板破裂引起的渗透性增高是矿井底板突水的主要控制因素;P. A. Charlez 通过水压致裂实验指出,随着水压增加和微破裂的发展,渗透性变化引起应力变化十分明显;D. P. Yale 等(2000)认为水压致裂模型中没有考虑损伤和渗透率的相互影响,导致一定程度的计算误差,而且在许多注水注浆工程中,在给定注水孔流体压力的情况下,发现在非稳态渗流阶段流体流量是先增加后平稳减小的,这一现象如果不从渗流—损伤—断裂耦合角度分析是无法解释的,而采用渗流—损伤—断裂耦合方法分析认为渗透压的增大使岩体裂隙张开度增加,翼形裂纹损伤扩展,从而导致渗透系数增大,流体流量增加,而渗流稳定后,裂隙的张开度和裂纹扩展也趋于稳定,渗透系数稳定,流量会平稳减少。

本书开展裂隙岩体渗流—损伤—断裂耦合的理论研究和工程应用研究,对裂隙岩体渗流场与损伤场之间耦合机理进行系统的研究,采用有限元、FLAC^{3D}对裂隙岩体渗流—损伤—断裂耦合进行数值研究,并将裂隙岩体渗流—损伤—断裂耦合理论应用于实际工程中,对含水裂隙岩体工程的失稳和水力劈裂机理进行了深层次的探讨。

第二节 国内外研究现状和进展

一、裂隙岩体渗流场—应力场耦合研究现状

渗流场与应力场耦合是多场广义耦合的重要内容,在力学领域中渗流场与应力场耦合作用又被称之为流—固耦合作用,而在地球科学领域中常称之为水—岩(土)相互作用。简单来说,流—固耦合研究的焦点在于研究固体介质和流体间的力学耦合基本规律。耦合现象和耦合问题越来越受到许多领域的学者和专家的重视,多场耦合理论从 20 世纪 50 年代国外水库诱发地震分析而萌生,到 70 年代正式提出,直至 80 年代以来 J. Noorisbad 等人的完善发展,这期间主要是由 N. Barton 等针对岩体的稳定性和冻土地区隧道涌水问题进行了地下水渗流场、应力场与温度场之间的耦合作用的探讨性研究。进入 90 年代中期,结合放射性废物处置问题的研究,瑞典核能研究所学者 L. Jing 等给出了相对较系统的岩体地下水渗流场、应力场、温度场耦合作用的研究模型,不过模型的简化实用性不是很好。

天然岩体中大量裂隙的分布,导致岩体渗透性的非均匀性和各向异性,毋庸置疑,裂隙介质的渗流—应力耦合问题要比孔隙介质复杂得多,岩体的渗流耦合理论借用了多孔介质耦合理论的原理,侧重对裂隙网络几何形态的描述,同样需要建立渗透率—应力应变耦合方程以及裂隙渗流有效应力方程。

有关裂隙水力耦合模型,发展最早的是平行板窄缝模型,它把裂隙概化为两光滑平行板之间的缝隙。1868 年,俄国著名流体学家布西涅斯基(Вопззынеащ)利用 Navier-Stochs 方程导出了液体在平行板隙中运动的理论公式,由于这一公式体现了裂隙的过流能力与裂隙开度的立方成正比的关系,所以常被称为立方定律。

天然裂隙由于形状不规则,粗糙度和起伏度大,提高了对水流的阻力,野外观察和实验研究表明:孔隙压力变化会引起有效应力的变化,明显地改变裂隙张开度和液体压力在裂隙中的分布,裂隙水通过量随裂隙正应力增加而降低很快。所以最初的耦合研究探讨裂隙渗透性与法向应力的关系。

C. Louis(1970)根据一些钻孔压水试验成果给出岩体渗透系数与法向应力呈负指数关系的经验公式;D. T. Snow(1968)提出了多组平行裂隙渗透系数随法向应力分布的计算公式;F. O. Jones(1975)提出了石灰岩裂隙渗透系数的经验公式;R. L. Kranz(1979)提出 Barre 花岗岩的裂隙渗透系数和应力呈幂函数的经验公式;J. E. Gale(1982)通过对花岗岩、大理岩和玄武岩三种岩体裂隙的室

内实验,得出导水系数和应力的负指数关系方程;Y. W. Tsang 等(1987)认为由于张开度的变化和岩桥的存在,裂隙渗流出现偏流现象。

王媛等(2000)提出了贯通裂隙的水力隙宽和应力呈负指数的公式;仵彦卿(1995)通过某水电工程岩体渗流与应力关系试验,得出了岩体渗透系数与有效应力存在幂指数关系;陈祖安等(1995)通过砂岩渗透率的静压力实验,应用毛细管模型,拟合了岩体渗透系数与压力的关系方程;J. B. Walsh(1979)、刘继山(1987)、N. Barton(1985)、周创兵(1996)等学者通过大量的研究工作,根据已有的平行板窄缝法向变形经验公式,再利用等效力隙宽与力学隙宽之间的关系来建立渗透系数—应力的关系式;田开铭等(1989)通过不同深度处渗透系数与法向应力的回归分析认为,岩体各渗透主值均随深度呈负指数规律递减,但递减率不同,垂直方向渗透主值递减的速率大于水平方向渗透主值的衰减速率,提出了应力对渗透张量的影响。

为了解释应力作用对裂隙面渗透的影响机理,Y. W. Tsang(1987)等人发现由于裂隙面在外力下压紧、咬合,通过单一裂隙的水流只集中于几条弯曲的沟槽之中,称之为沟槽流模型;F. Gangs 提出了钉床模型,以钉状物的压缩来反映应力对渗流的影响;J. B. Walsh(1979, 1981)提出了洞穴模型;Y. W. Tsang 和 P. A. Witherspoon(1987)提出了洞穴凸起模型,该模型很好地解释了单裂隙面渗流、力学及其耦合特征;赵阳升、郑少河、常宗旭等进行了三维应力条件下的岩体裂隙渗流实验,得到了三维应力条件下的单裂隙面渗流—力学耦合作用的方程。

仵彦卿和柴军瑞(1996)建立了在裂隙壁加法向渗透压力和切向拖曳力的两场耦合模型;J. Esaki(1992)就岩体的剪切渗流耦合进行了试验,并对参数取值进行了研究;耿克勤、夏才初等对剪切变形与渗流耦合进行了试验研究,解释了在不同压应力作用下裂隙面剪缩和剪胀的原因。

岩体由于受不同尺度各种不连续面影响,呈现出明显的不连续性、非均匀性和各向异性,其力学特性,尤其是渗流特性相当复杂。岩体应力—渗流耦合分析的概念模型与岩体渗流的概念模型相似,可以分为拟连续介质模型、离散裂隙网络模型和双重介质模型。最初的岩体应力—渗流耦合研究主要借鉴土体固结的研究成果,采用多孔介质连续模型。随着实际工程对模拟精度要求的提高和地质统计方法的广泛应用,离散网络模型成为研究的热点,出现了一套比较完整的基于随机网络的离散网络模型和分析方法。近年来,随着 DECOVALEX 等大型岩石工程的兴起,大尺度范围研究和确定性研究越来越受到重视,加之对岩体应力—渗流耦合机理研究的深入,离散裂隙网络模型已经无法满足上述要求,因此更高层次的等效多孔连续介质模型的研究正成为概念模型研究的热点和

前沿。

(1) 拟连续介质耦合模型

拟连续介质模型是以 D. T. Snow(1968)创立的渗透张量理论为基础,用连续介质方法描述岩体的渗流问题。渗流张量是按裂隙格局统计平均参数所建立的,可以表征裂隙介质及其水流的各向异性。根据统计原理,平均值只是在不存在系统变化的情况下才能可靠地描述岩体,所以只有在岩体的小体积范围,即在系统变化不明显的地方,才能应用渗透张量理论。拟连续介质模型认为,只要裂隙岩体的本构关系和相关的参数能够通过连续介质力学的基本理论加以重新建立,其宏观行为就能够由连续介质力学特征进行描述。与离散裂隙网络模型相比,拟连续介质模型将不连续裂隙的各种作用(力学作用和渗流作用)包含在等效连续本构模型和相关参数中,可以直接利用连续介质力学中大量比较成熟的结论和方法,避免了求解非连续问题的困难,因此更适合描述大尺度裂隙岩体的总体力学和渗流行为。表征体元(REV)是等效连续介质模型中一个重要概念:REV 是一个尺度,大于该尺度,则 REV 的等效连续性质(包括力学性质和水力学性质)可视为常数,各种等效连续方法都必须在 REV 尺度上运用,这样才能保证方法的有效性。对于裂隙岩体的 REV,通常有下列两个问题:① 给定的裂隙岩体 REV 是否存在;② REV 应该取多大。对这两个问题,肖裕行等建立了半理论一半数值的判别方法。P. H. Kulatilake 等通过对一组不同尺度的随机裂隙网络模型进行数值分析比较,得到了一些初步的定性结论:裂隙密度越大、几何尺寸越大、节理间的交角越大,则 REV 越小,反之亦然;同时,有些情况下,不存在 REV,即无论 REV 取多大,都不能得到等效连续的行为。P. L. La Pointe 认为,裂隙岩体的 REV 是否存在主要取决于裂隙系统的几何形态、模型的尺度和单裂隙的性质。目前对 REV 上述两个问题的研究仍在进行中,有学者提出,在使用等效连续介质模型时,对 REV 的选取应该相当小心,而且必须结合具体问题分析。

早期关于拟连续介质耦合模型的研究,以 M. Oda 为代表,根据裂隙岩体中裂隙方向、大小、开度的概率密度分布,分别推导出裂隙岩体等效各向异性弹性矩阵和渗透系数张量,由 Barton-Bandis 公式,求出裂隙开度的变化。周创兵、熊文林(1996)对 M. Oda 的统计公式作了推广,进行了渗透特性与变形的耦合分析。

陶振宇等(1988)对岩体渗流—应力进行耦合分析,以研究水库诱发地震的情况,用迭代法求解使耦合的应力场达到稳定;常晓林(1987)基于渗透主轴与应力主轴保持重合的假定,得到弹性各向同性介质的耦合关系式;王媛等(1998, 2007)基于拟连续介质耦合模型提出了裂隙岩体渗流与应力耦合的“四自由度全耦合分析方法”,其基本思路是:将裂隙岩体渗流场和应力场作为同一场,联立裂

隙岩体满足的渗流方程和应力方程,建立以节点位移和节点渗流水压力为未知量的耦合有限元方程组;赵阳升等(1992,2008)从土力学固结理论出发,根据煤层注水的大量工业试验和大尺度岩体的渗透实验,提出了固体与(不)可压缩流体相互作用的流—固耦合数学模型,将耦合模型广泛应用于煤层注水、承压水上采煤突水分析、盐类矿床的开采。

拟连续介质模型可采用经典的孔隙介质渗流分析方法,使用上极为方便。对于岩体渗流,只要岩体渗流的样本单元体积(REV)存在且不是太大(小于研究域的 $1/20 \sim 1/50$),应尽量采用等效连续介质模型作渗流分析。

(2) 离散裂隙网络耦合模型

由裂隙(如节理和断层等)个体在空间上相互交叉形成的网络状空隙结构,其含水介质称为裂隙网络介质。由相互贯通且裂隙中的水流为连续分布的裂隙构成的网络,称为连通裂隙网络;由互不连通或存在阻水裂隙且裂隙中的水流为断续分布的裂隙构成的网络,称为非连通裂隙网络。

岩体应力—渗流耦合的离散裂隙网络模型(discrete fracture network, DFN)假定完整岩块的透水性远小于裂隙,近似认为岩体中的渗流只存在于裂隙之中。该模型有两个关键点:① 裂隙系统的几何形态(包括位置、长度、方向和隙宽等);② 单条裂隙的变形、渗流及耦合规律。离散裂隙网络模型对裂隙系统的描述建立在裂隙各个参数(位置、长度、方向和隙宽等)服从某一概率分布的假设基础上。通过对现场岩体露头 and 观测平硐所得裂隙勘测数据的统计分析,确定各个概率分布的参数;然后根据概率分布,在模型中随机生成裂隙网络进行计算。通常假设:裂隙为圆盘形;圆盘中心点构成一个三维泊松过程;圆盘直径(迹长)是相互独立的,具有相同的分布,一般为正态分布或指数分布;圆盘产状是相互独立的,具有相同的分布,一般为 Fish 分布或 Bingham 分布,直径和产状相互独立;裂隙开度也是相互独立的,具有相同的分布,一般为对数正态分布。宋晓晨对随机裂隙网络的生成方法做了详细的介绍。目前,离散裂隙网络模型多用于裂隙岩体渗流计算,如 B. Dverstorp、王恩志、张有天、王洪涛、杜广林等;而用于实际裂隙岩体应力—渗流耦合分析的研究相对较少,张有天采用离散裂隙网络,提出增量渗透载荷的裂隙岩体渗流—应力耦合分析方法。离散元方法或 DDA 方法是主要的数值模拟手段,柴军瑞(2000)建立了岩体渗流场与应力场耦合分析的多重裂隙网络模型,研究大坝及其周围地质体的稳定性。张国新和武晓峰(2003)用 DDA 法研究渗流—变形耦合对岩石边坡稳定性的影响。离散裂隙网络模型的优势在于能够较为精确地表征小尺度的裂隙岩体耦合特征。而在大尺度研究中,离散裂隙网络模型需要大量的裂隙统计数据,实际工程中,只能从有限的地表露头和观测硐中获得少量的资料,由此生成的随机模型具有

很大的不确定性。此外,要把每一条裂隙的力学和渗流特性都详细模拟,其计算量相当庞大,以至于难以或无法实现。事实上,绝大部分大尺度研究并不需要详细了解每一条裂隙的应力—渗流耦合特征,而只需要得到宏观结论。因此,随着一些大尺度研究项目的兴起,以及很多新的数学、力学方法的出现,等效连续介质模型重新焕发出了新的生机和活力。

(3) 双重介质耦合模型

由裂隙(如节理、断层等)和其间的孔隙岩块构成的空隙结构,裂隙导水(渗流具有定向性)、孔隙岩块储水(渗流具有均质各向同性),这种含水介质称为双重介质,即 Г. Ы. Ваяевлатт(1960)提出的双重介质。根据裂隙系统的上述特点,将那些控制渗流总体分布且起主导渗透作用的大裂隙定义为裂隙岩体中的主干裂隙网络(dominant fractured networks);而将主干裂隙网络间的岩块定义为裂隙岩块(fractured-matrix)。由主干裂隙网络和其间的裂隙岩块所构成的具有相对导水和贮水作用的水文地质体称为双重裂隙系统。根据岩体空隙的表现形式把岩体空隙结构划分为准孔隙结构、裂隙网络结构、孔隙—裂隙双重结构、孔洞—裂隙双重结构、溶隙—管道(或暗河)双重结构等。典型的双重介质模型如图 1-1 所示。

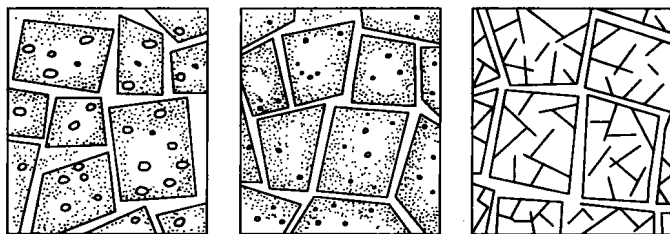


图 1-1 双重介质模型示意图(据朱学愚,1991)

双重介质模型是由苏联学者巴伦布拉特(Ваяевлатт)于 1960 年提出的,假定岩体是孔隙介质和裂隙介质相重叠的连续介质(即孔隙—裂隙二重性),孔隙介质贮水,裂隙介质导水。很多学者提出了各自的双重介质理论模型,不同之处在于对裂隙系统和孔隙系统以及两系统之间的水交替进行了不同的概化。黎水泉、徐秉业(2000)提出一种考虑介质参数随压力变化的双重孔隙介质非线性渗流模型,研究耦合过程中孔隙压力和裂隙压力随时间的变化规律;杨栋等(2000)根据裂隙发育规模与工程尺度的关系,将裂隙岩体看做由离散介质和拟连续介质组成的广义双重介质岩体,提出了广义双重介质岩体水力学模型,并对其有限元解法进行了较为详细的研究;吉小明等(2003)基于孔隙—裂隙岩体的双重孔隙介质流—固耦合计算的微分方程,利用伽辽金有限元法给出的相应

限元公式,并基于岩体分类指标(RQD, RMR)提出了与岩体应力状态相关的渗透系数计算公式,编制了相应的有限元程序;赵颖等(2004)通过对双重孔隙介质有效应力的研究,建立了各向异性双重孔隙介质线弹性变形的有效应力定律,并在此基础上分析了横向各向同性及结构各向异性、固体材料各向同性时的有效应力定律形式;刘晓丽(2005)基于岩体渗流水力学和多相渗流力学理论,将工程地质体简化为孔隙—裂隙双重介质,建立了水—气二相渗流与双重介质变形的流—固耦合数学模型,编制出三维有限元计算程序;赵延林等(2007)将双重介质理论引入裂隙岩体热—水—力耦合的研究中,将裂隙岩体视为离散裂隙介质和拟连续介质的双重介质体系,建立了双重介质温度场—渗流场—应力场耦合模型及数值解法,温度场—渗流场—应力场耦合路径如图 1-2 所示。

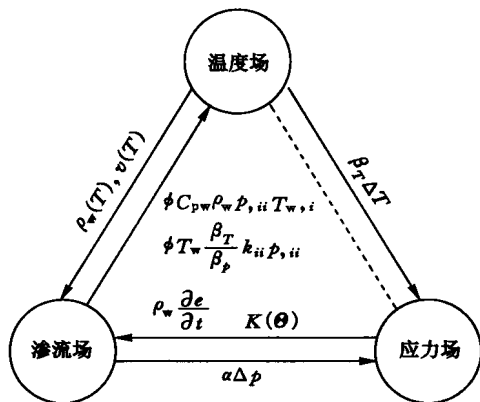


图 1-2 双重介质温度场—渗流场—应力场耦合路径

双重介质耦合模型,除包含裂隙网络外,还将岩块视为渗透系数较小的渗透拟连续介质,研究岩体孔隙与裂隙之间的水交换,这种模型更接近实际,但数值分析工作量比较大。

(4) 渗流场—损伤场耦合模型

岩体水—岩耦合作用的研究主要集中在预制裂隙渗透系数与应力(应变)间的相互关系上,认为岩体的渗透系数是裂隙面法向应力(应变)的函数,在裂隙渗流—应力耦合数值模拟方面,目前普遍把裂隙的变形考虑成弹性变形。实际上,当拉应力和剪应力较高时,裂隙尖端会产生开裂,裂隙面附近的岩块内可能产生新的翼形裂隙,这些变化会对渗流过程产生显著影响。所以涉及岩体损伤破裂过程中新裂纹的萌生、扩展和贯通过程中渗透张量的演化及其与应力的耦合作用模型开始越来越得到人们的重视。

郑少河、易顺民等在渗流场与损伤应力场的耦合理论和数值模拟方面进行探索和研究,建立了数值模型并将耦合模型用于三峡工程永久船闸高边坡裂隙岩体中;唐春安、杨天鸿等研制的 RFPA-FLOW 软件从细观力学的层次解释宏观工程岩体渗流—应力耦合作用下的破坏、失稳行为;江涛基于细观力学的基本理论和方法,推导出基于细观力学的脆性岩石损伤本构模型和损伤—渗流本构模型,但对损伤—渗流耦合模型在大尺度实际工程中的应用问题没有作深入研

究;庄宁(2006)以颗粒流理论为基础,运用 PFC 软件从细观力学角度研究了渗流耦合过程中裂隙岩体中裂纹的扩展萌生规律,并以此为基础运用宏观断裂力学等理论推导了渗流耦合过程中裂纹的扩展萌生公式,然后将裂纹的扩展公式代入渗透系数表达式,作为渗流场—应力场之间耦合的桥梁,建立了裂隙岩体的渗流—应力耦合数学计算模型。

渗流场—损伤场之间的耦合旨在应用断裂力学、几何损伤力学、岩石流体力学探讨在开挖应力、地应力及渗透压力共同作用下裂隙的张开度、扩展和贯通规律。裂隙岩体渗流场—损伤场耦合效应较真实地反映了在渗流场和应力场共同作用下裂隙岩体工程的损伤演化和失稳破坏。

裂隙岩体流—固耦合模式主要有两类:① 直接耦合法,将渗流场与应力场直接耦合。无需进行渗流场及应力场反复迭代,只要按时间过程连续求解可得全部结果,概念清楚,且每一时步不存在收敛问题。但是这一方法也有缺点:总体刚度矩阵是非对称的,对角线元素绝对值常相差若干个数量级;需要较大的存储容量,总体刚度矩阵接近奇异,可能影响解题精度。王媛在其一系列论文中,完成了 4 自由度(3 个位移分量加水头)全耦合分析,该方法考虑了渗流自由面,又认为渗透张量是应力张量的函数,将渗流与弹塑性问题在同一迭代中完成,给直接耦合法带来了新的活力,有望得到推广应用。② 间接耦合法,这是大多数流—固耦合模型采用的耦合模式。给定相应于初始应力场的初始渗透张量,求解渗流体积力载荷进行应力场分析,再根据求得的应力张量修改渗透张量,重复上述过程,直到渗透张量不再改变为止。由于两场分开计算,求解应力及水头矩阵是对阵的,节省存量和时间,也不会因刚度矩阵奇异而影响精度,对于许多问题,用间接耦合法要方便得多。

随着商业软件成熟与发展,越来越多的商业软件具有流—固耦合的模块,但是各软件的耦合原理却是不相同的。美国 ITASCA 公司提供的 FLAC^{3D} 作为岩土工程中成熟的计算软件,采用快速拉格朗日法可以模拟流体通过可渗透固体的流动,例如模拟地下水在土体中流动固体的力学响应,如有效应力的减小可能产生塑性屈服。另外,区域内的流体也会通过改变孔隙压力来响应体积的变化。FLAC^{3D} 的流动建模可以由其本身完成,也可以同力学建模并行完成,以便获得流—固耦合作用的效果。更重要的是,FLAC^{3D} 作为开放性计算软件具有强大的编程功能,能自定义本构模型,能通过编写 FISH 程序来扩展 FLAC^{3D} 的计算功能。美国 ITASCA 公司提供的离散单元法商业软件有二维平面分析软件 UDEC 和三维分析软件 3DEC,它们可以模拟地下水在岩体裂隙中流动规律,并能实现流—固耦合数值计算。Zhang Xing 等(2002)改进了 UDEC 程序,在其基础上耦合了考虑孔隙渗流和裂隙渗流规律的双重介质模型,模拟分析高水压力

和偏应力作用下岩石渗透的各向异性。基于 ANSYS 中的热传导分析与渗流场分析方程的相似性,可以进行渗流场三维动态分析,通过编写渗透体积力的程序也能实现流—固耦合。

二、裂隙岩体断裂力学、损伤力学研究现状

岩体断裂力学是工程地质学与断裂力学交叉的边缘学科,它将岩体的断续节理、裂隙模拟为裂纹,把岩体不再看做完整的均质体,而看做包含众多裂纹的复合结构体。运用断裂力学的方法,可以追踪岩体中节理裂隙的起裂、扩展到相互贯通、岩体局部破坏的过程,从而揭示出岩体失稳的渐进破坏机制。岩石断裂力学研究开始于 20 世纪 60 年代,并在 1973 年第三届国际断裂力学会议上首次列为专题研究。此外还召开了一些专门会议,如 1974 年北大西洋公约组织曾在冰岛开会讨论地球动力学和岩石断裂力学。国内这方面的研究工作始于 70 年代末,开展了岩石断裂韧度试验,应用断裂力学概念探讨了地震的破裂过程和地震预报。近 20 年来,由于现代岩体工程对岩体质量提出了新的要求,更加经济而安全的工程设计要求岩土工程师对岩体力学性质的研究更为深入仔细,使岩体断裂力学的研究成为一项热门课题。所以岩石断裂力学真正引起岩石力学的广泛重视,并逐步形成一门新的岩石力学分支是近 10 年的事。国内外许多学者对岩体断裂力学的研究主要针对岩石断裂韧度测试、拉剪与压剪复合断裂、裂纹扩展方向、长度以及裂纹动态扩展的物理性状与微观机理等方面。

对于岩石断裂的研究,更多的学者是把线弹性断裂力学的现成理论直接用于岩石断裂力学。由裂纹前缘的应力位移,根据断裂强度因子判断裂纹断裂的扩展及其开裂方向,从而揭示岩体的破坏机制。T. Poston 等(1978)利用 Griffith 能量准则首次分析了类似于岩体的脆性材料压剪断裂过程中裂纹扩展方向与原生裂纹走向的关系。E. Z. Lajtai(1977)认为裂纹受压剪应力作用时,除了拉应力集中外还有压应力集中,并产生垂直于受力方向的正剪切裂纹,考虑裂纹端部的不均匀应力场,通过应力梯度模型,建立了压剪断裂新的强度理论。刘东燕(1999)对断续节理岩体中压剪应力条件下裂纹扩展的随机性从断裂力学角度进行了研究,建立了压剪应力条件下裂纹的断裂力学概率模型,并讨论了节理岩体的失效概率与裂纹几何、力学各参数之间的关系。周小平等(2003)利用 Dugdale-Barenblatt 模型揭示了多节理贯通力学机理——主要受外部载荷和节理间的相互作用两因素的影响。利用裂纹尖端的应力强度因子、损伤局部化区的长度确定了节理扩展和贯通的力学条件。黎立云等(2005)利用断裂力学中的裂纹尖端应力和应变场的极值分布情况研究了多裂纹贯通的机制。周家文等(2007)在分析压剪复合型裂纹尖端应力场的基础上,利用最小 J_2 准则得到压剪

裂纹的起裂角。把岩石压剪断裂问题与岩石的破坏准则联系在一起,利用岩土材料中广泛应用的 Mohr-Coulomb 准则和 Drucker-Prager 准则分别建立两个岩石压剪断裂判据。C. A. Tang 和 R. H. C. Wong 等对类岩石材料的多裂纹体进行了实验研究并用 Rock Failure Process Analysis (RFPA^{2D})对裂纹的贯通和岩石的破坏进行了系统的数值研究。

将岩体断裂力学引入裂隙岩体渗流分析中,多年来,国内外学者运用断裂力学对岩体渗流问题进行了广泛的理论研究。Z. P. Bazant(1983)基于断裂力学理论的数值分析,提出了多种宏观断裂模型——分离裂缝模型、分布裂缝模型和内嵌单元裂缝模型来模拟岩石、混凝土受拉开裂后所形成的裂缝。N. Keivan(2000)用分离裂缝模型和分布裂缝模型研究混凝土圆环的内胀裂。M. Vandamme 和 J. C. Roegiers(1990)提出了水力压裂的耦合解。E. Douranary 等(1990)利用流—固耦合理论讨论了水力压裂的起裂、扩展和闭合全过程的流—固耦合现象,指出流—固耦合在水力压裂中应用的重要性。黄润秋等(2000)结合有效应力原理研究了水压力对裂纹扩展的力学机制。孙粤琳等(2008)应用无单元法,考虑渗流场与应力场的耦合作用,对岩体内初始裂缝的扩展进行追踪,应力场和渗流场的耦合作用通过以渗透压力和渗透系数为交互因子的迭代计算考虑。汤连生等(2004)在探讨静水压力、动水压力及水化学损伤对裂纹尖端应力强度因子影响的基础上,推导给出了考虑水压力和水化学损伤作用等不同条件下的含闭合或张开裂纹的岩体断裂强度新准则。

裂隙岩体含有众多裂隙,试图逐一模拟和描述每一条裂隙的应力应变状态并研究其断裂扩展过程既不可能也不现实,因此有必要在断裂力学对裂隙扩展机制研究的基础上,借助损伤力学理论来模拟裂隙岩体的总体损伤力学响应。连续损伤力学是研究材料和结构损伤、破坏过程机理的重要工具,并在岩体力学领域得到应用,显示出良好的发展前景。自 L. M. Kachanov(1958)研究蠕变断裂并首先提出“等效连续性因子”的概念及 Y. N. Rabotnov 在 L. M. Kachanov 研究的基础上提出“损伤因子”的概念以来,法国学者 J. Lemaitre(1984)和 J. L. Chaboche(1981)及美国学者 D. Krajcinovic(1981)等通过连续介质力学方法,根据不可逆热力学定律创立了损伤力学这门新学科。J. W. Dougill 等最早把损伤力学应用到岩石和混凝土材料;Z. Dragon(1979)根据断裂面的概念研究了岩石的脆塑性损伤行为,并建立了相应的连续介质模型;J. Lemaitre 从岩石材料本身结构特征出发,研究其损伤机理,建立了相应的模型和理论,从而使岩石损伤力学研究进一步丰富和完善;T. Kawamoto(1985)利用二阶对称张量,将各向异性损伤理论引入非连续岩体研究中,用有限元实现了对损伤岩体变形量的预测;M. Cao 和 H. Horii(1993)采用体积平均应力、应变的方法,建立了裂隙