

山区隧道涌水量计算中的双场 耦合作用研究

黄 涛 杨立中 著

国家自然科学基金项目 (49872082) 资助

西南交通大学出版基金资助

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

内 容 简 介

涌水是山区隧道工程施工中的重大地质灾害之一。对于山区隧道裂隙围岩介质而言,由于其结构特性与所赋存环境的复杂性,使得这一问题的解决具有一定的难度。基于作者在岩体水力学领域对这一问题的系统理论研究及工程实践的分析应用,本书将岩体水力学中相关的渗流场与应力场耦合作用的裂隙介质渗流理论引入到山区特长深埋隧道的涌水量预测中,在将裂隙围岩介质渗透性能等效处理的基础上,提出了渗流与应力耦合环境下裂隙围岩隧道涌水量预测计算的确定性数学模型方法(包括理论解析法、经验解析法和水文地质数值模拟法),并应用它对一隧道工程实例进行了计算验证。

本书可作为高等院校和研究院从事岩体水力学领域相关研究的教师、研究生及研究人员教学、研究参考用书,也可供从事山区铁路、公路特长深埋隧道的勘察设计和施工的人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

山区隧道涌水量计算中的双场耦合作用研究 / 黄涛,
杨立中著. — 成都:西南交通大学出版社, 2002.4
ISBN 7 - 81057 - 625 - 9

. 山... . 黄... 杨... . 隧道工程 - 涌水
- 计算 . U452

中国版本图书馆CIP数据核字(2002)第008809号

山区隧道涌水量计算中的双场
耦合作用研究

黄涛 杨立中 著

*

出版人 宋绍南

责任编辑 蒋雅君 贾刘强

封面设计 肖勤

西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段111号 邮政编码:610031 发行科电话:7600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

E-mail: cbs@center2.swjtu.edu.cn

西南冶金地质印刷厂印刷

*

开本:787 mm × 1092 mm 1/16 印张:9

字数:206千字 印数:1—500册

2002年4月第1版 2002年4月第1次印刷

ISBN 7-81057-625-9/U·053

定价:18.00元

前 言

随着国民经济的飞速发展，大量山区铁路越岭隧道的建设，隧道修建及运营过程中涌水地质灾害已成为勘测设计阶段需重点考虑的问题之一，而隧道可能涌水区段及涌水量大小的预测计算为这一问题关键之所在。同时这一问题也是国内外学者、专家长期致力的一项重大研究课题。

基于特长深埋隧道工程勘测设计、施工及运营中对解决涌水量问题的迫切需要的实际，针对我国目前隧道涌水预测与国内外裂隙介质渗流理论的发展水平不相适应以及隧道含水裂隙围岩体水力学特征研究中地下水渗流场与应力场相互影响的研究相当薄弱这一基本情况，本书提出了地下水渗流场与应力场耦合环境下裂隙围岩型隧道涌水量预测计算研究命题。该工作的研究目标是将岩体水力学中相关的渗流场与应力场耦合作用的裂隙介质渗流理论引入到山区特长深埋隧道的涌水量预测中，建立符合实际情况的双场（地下水渗流场与裂隙岩体应力场）耦合作用数学模型并开发出用现代电子计算技术进行涌水量预测的计算方法和程序。为达到这一研究目标，笔者设计了分层次系统研究的技术路线和工作程式，即隧道围岩裂隙介质的赋存环境研究 结构特征研究 渗流场研究 应力场研究 渗流场与应力场耦合作用研究 耦合环境下涌水量预测研究。本书便是在此研究成果基础上写成的。

全书共分8章。第一章概略介绍了国内外关于隧道涌水量计算及岩体水力学中有关裂隙岩体地下水渗流场与应力场耦合作用研究的历史和现状，重点提出了研究工作的选题和相应的研究技术路线。第二章阐述了对隧道裂隙围岩体结构特征的研究，即应用数理统计学及随机模拟学方法，对隧道含水裂隙围岩介质的结构特征进行量化分析，确定其围岩结构类型，为裂隙围岩介质水力学及力学性质的研究提供建模依据。第三章全面论述了对隧道裂隙围岩体中地下水渗流场的研究，即以单条裂隙结构面中地下水渗流特性研究为基础，提出了对裂隙围岩介质中地下水渗流场进行分析研究的三类数学模型（包括双重介质模型、等效连续介质模型和离散裂隙网络模型），并首次引入三维有限单元数值模拟方法对等效连续介质模型进行计算。第四章则以弹性力学理论为依据，建立了隧道裂隙围岩介质所赋存地应力场环境的数学模型，达到了对隧道裂隙围岩体赋存地应力场的定量研究。第五章考虑到研究中能真实反映隧道含水裂隙围岩介质发生涌水地质灾害的实际情况，在克服以往这一方面研究工作中不足的前提下，根据对隧道含水裂隙围岩介质中地下水渗流场与地应力场耦合作用的机理研究，尝试性提出了双场耦合作用数学模型，与类似研究不同的是，在模型中将地下水渗流作用力作为点集中荷载考虑。第六章以双场耦合作用机理研究及耦合数学模型的求解为基础，得出了渗流场与应力场耦合环境下裂隙围岩型隧道涌水量预测计算方法（解析法和水文地质数值模拟法）和相应的研究工作程式。第七章将研究得出的渗流场与应力场耦合环境下裂隙围岩型隧道涌水量预测计算的研究工作程式应用于目前在建西（安）—（安）康铁路秦岭特长隧道涌水量的预测计算中，得到了较好的效果。第八章全面介绍了本次研究工作所取得的成果和对以后相关研究的启示。

本书的雏形是黄涛的博士论文“渗流场与应力场耦合环境下裂隙围岩型隧道涌水量预测的研究”，此书的撰写是结合国家自然科学基金项目《大型地下工程中地质灾害发生机理的双场耦合效应研究》（49872082）和铁道部“九五”重点科技发展计划项目《隧道岩体突水、涌水预测及预报的研究》（95G48—H）完成的。该书有关内容经国内包括中国科学院院士袁道先、中国工程院院士王梦恕、工程设计大师史玉新及铁路设计院、科研单位、高等学校等多位专家教授审阅，给予了充分的肯定，并提出了许多宝贵意见。但限于研究水平，书中定有许多不足之处，恳请读者予以批评指正。

在本书出版之际，作者感谢国家自然科学基金资助项目《大型地下工程中地质灾害发生机理的双场耦合效应研究》（49872082）提供的研究经费和西南交通大学出版基金委员会为本书出版提供的专项资助；与此同时，对西南交通大学地质工程系的李秉生教授、蒋爵光教授、罗健教授、胡厚田教授、钱惠国教授和韩会增教授为本研究的开题工作进行的有益指导表示诚挚的谢意。

感谢铁道部第一勘测设计院西安分院秦岭地质大队为本项研究提供了大量的现场第一手资料，并为研究中的野外工作给予了极大的帮助。

感谢国家自然科学基金项目《大型地下工程中地质灾害发生机理的双场耦合效应研究》（49872082）和铁道部“九五”重点科研项目《隧道岩体突水、涌水预测及预报的研究》课题组的刘丹教授、李巧文副教授、郑黎明副教授和钟生军工程师，他们对研究工作的正常进行付出了辛勤的劳动。

黄涛 杨立中

2001年9月于西南交通大学

目 录

第一章 绪论	1
第一节 研究现状	1
第二节 研究工作的选题、研究技术路线及创意	7
第二章 隧道裂隙岩体的结构特征研究	9
第一节 裂隙岩体结构的基本特征	9
第二节 裂隙岩体结构的统计分析	13
第三节 裂隙岩体结构面网络随机模拟	30
第三章 隧道含水裂隙岩体渗流场的研究	36
第一节 单个裂隙结构面中地下水渗流规律的研究	36
第二节 裂隙岩体中地下水渗流规律的研究	45
第三节 隧道裂隙岩体系统渗流参数的确定	52
第四节 隧道裂隙岩体渗流数学模型的数值法求解	57
第四章 隧道裂隙岩体应力场的研究	63
第一节 隧道裂隙岩体应力场的基本特征	63
第二节 隧道裂隙岩体应力场的确定	65
第五章 隧道裂隙岩体渗流场与应力场耦合作用的研究	75
第一节 隧道裂隙岩体中应力场对渗流场影响作用的研究	75
第二节 隧道裂隙岩体中渗流场对应力场影响作用的研究	80
第三节 隧道裂隙岩体渗流场与应力场耦合作用的定量研究	86
第六章 渗流场与应力场耦合环境下裂隙围岩型隧道涌水量的预测研究	89
第一节 渗流场与应力场耦合环境下裂隙围岩型 隧道涌水量预测的工作程式研究	89
第二节 渗流场与应力场耦合环境下裂隙围岩型 隧道涌水量预测计算的研究	90
第七章 秦岭特长隧道含水裂隙岩体渗流场与应力场耦合环境下 涌水量的预测计算研究	105
第一节 秦岭特长隧道的基本简况及其地质背景	105

第二节	秦岭特长隧道含水裂隙岩体地下水渗流场与 应力场耦合作用数学模型的建立.....	112
第三节	秦岭特长隧道含水裂隙岩体渗流场与应力场耦合环境下 涌水量的预测计算研究.....	127
第八章	结束语.....	135
第一节	主要结论.....	135
第二节	启示.....	137
参考文献	138

第一章 绪 论

自 1825 年英国建成世界上第一条铁路以来,铁路建设已经历了 170 多年。在近两个世纪的铁路发展史中,铁路建设时刻都与当时社会生产力的发展水平相结合。20 世纪 80 年代以来,随着我国国民经济飞速发展的需要,山区铁路建设大量增加,根据目前的铁路施工设备和施工技术,铁路选线大多以长大隧道的方式通过越岭地段,如已建京广复线上的大瑶山隧道(14.295 km)及在建西康线的秦岭隧道(18.4 km)等。铁路以长大隧道的方式通过越岭地段,不但极大地提高了线路质量等级,为铁路的高速重载奠定了基础,同时也显著改善了铁路建成后的运营环境。但是在隧道的建设施工中,由于隧道本身穿越不同的地质单元体,从而将不可避免地遇到涌水、岩爆、坍塌及地热等地质灾害,其中尤以涌水最为普遍和严重。据不完全统计,我国 1992 年前已建成铁路隧道中,有五分之四在施工中不同程度地发生过涌水灾害,其中有 30 余例属大型涌水,总涌水量均超过 10 000 m³/d,如京广线长 6.06 km 的南岭隧道,总涌水量最大达 81 000 m³/d,成昆线沙木拉达隧道(6.379 km)总涌水量达 19 550 m³/d。在日本近 2 130 km 的铁路隧道中,发生涌水病害的也约占总隧道座数的 56% 以上。不仅如此,由于施工中的防排水措施不当,涌水灾害常常波及到隧道建成之后的运营阶段。据调查,迄今我国仍有三分之一的运营隧道受到地下水的不良影响,有时甚至中断行车,给铁路运营带来巨大的损失。针对上述实际情况,如何在隧道勘测设计阶段准确预测其涌水量的大小,为隧道施工运营制定合理的防排水措施提供依据,就成为众多隧道及地下工程学者所日益关注的问题之一。尤其是对于大多数隧道来说,其围岩介质类型为裂隙型或裂隙岩溶型岩体,而这类岩体介质中的地下水赋存并运移于裂隙结构面网络中,从而对这类隧道裂隙围岩介质渗透性能的研究构成了隧道通过含水围岩区段时涌水量大小预测计算的基础性工作。

第一节 研究现状

一、隧道涌水预测的研究

隧道涌水灾害是铁路、公路等交通基础设施建设中严重的地质灾害之一,它不仅影响隧道建设的正常施工,而且还会波及到隧道建成后的安全运营,有时甚至会导致行车中断,造成巨大的经济损失。鉴于隧道地下水问题的重要性,历来在隧道工程的修建中,国内外学者及工程技术人员都非常重视隧道涌水的预测问题,对此进行了大量勘探、试验和分析研究工作。

隧道地下水涌水的预测是从定性分析开始的。最早的预测只是通过查明隧道含水围岩中地下水的分布及赋存规律,分析隧道开挖区的水文地质及工程地质条件,依据钻探、物探、水化学及同位素分析、水温测定等手段,确定地下水的富集带或富集区,以及断裂构造带、裂隙密集带等可能的地下水涌水通道,并且用均衡法估计隧道涌水量的大小。随着技术水平和施工要求的提高,基于定性分析的隧道涌水预测研究发展成为隧道涌水的定量评价和计算,主要体现在隧道涌水位置的确定和涌水量预测这两个方面。

在隧道涌水位置的确定方面,人们通过对隧道围岩水文地质及工程地质条件的定性分析,发展了随机数学方法和模糊数学方法。在涌水量预测问题上,人们根据隧道环境地下水所处地质体的不同性质、水文地质条件的不同复杂程度、施工的不同方式及生产的不同要求等因素,提出了隧道涌水量预测计算的确定性数学模型和随机性数学模型两大类方法。其中确定性数学模型方法是利用水力学、地下水动力学等方面的理论,通过数学演绎,推导出隧道涌水量与环境地下水位、围岩渗透性、地下水补给范围、补给时间等因素的定量关系,得出一系列理论或经验解析公式,以预测计算隧道的涌水量。这类方法包括了水文地质类比法(比拟法、径流模数法)、水均衡法、解析法和数值模拟法等。而随机性数学模型方法则是基于对与隧道涌水相关水文地质及工程地质条件不甚了解的前提下,把隧道施工中产生的各种与涌水有关的信息作为输入因子,把涌水造成的灾害或涌水量作为输出响应,利用随机理论建立输入信息与输出响应之间的随机关系,进而预测预报隧道的涌水问题。这类方法主要包括“黑箱(Black Box)”理论法、灰色系统理论法、时间序列分析法和频谱分析法。

二、隧道围岩介质渗流特性的研究

众所周知,隧道穿越的围岩介质大多为裂隙型和裂隙岩溶型。就裂隙型围岩介质而言,它是由众多定向展布的裂隙组构成的不均一裂隙含水网络。裂隙含水介质中的地下水由于受定向展布裂隙组的控制,使地下水的运动只能沿裂隙面之间的缝隙实现。当地下水的运动方向与裂隙面的法线垂直时,地下水最易流动;平行时,则根本无法运动,导致了裂隙型含水介质渗透的各向异性,即垂直于隙面法线方向的渗透性最好,平行隙面法线方向的渗透系数最小。同时,由于构造应力分布的非均匀性和地层岩性的差异性,使得岩体中裂隙在空间上的发育程度强弱不同,裂隙发育密集的地方其渗透性好,发育弱的地方其渗透性差,又导致了裂隙型含水介质渗透的非均匀性。

裂隙岩溶型围岩介质是裂隙型可溶围岩受裂隙网络中地下水的溶蚀作用而分异扩容所形成的。因而裂隙岩溶型围岩介质相对裂隙型围岩介质来说,其渗透性能的各向异性和非均质性则更加显著。

裂隙型和裂隙岩溶型围岩介质渗流的各向异性和非均质性特点,使得传统多孔介质渗流理论对其渗透性研究已无能为力,从而要求寻求裂隙介质渗流理论来解决这一棘手问题。

综观国内外有关裂隙介质渗流特性的研究,大致可分为不考虑变形条件下裂隙介质渗流特性研究和变形条件下裂隙介质渗流特性研究两方面。

(一) 不考虑变形条件下裂隙介质渗流特性研究

该领域是从单裂隙中渗流问题的研究起步的,早在 20 世纪 40 年代,前苏联学者

(1941) 及稍后的 (1951) 在实验室用一对平行板模拟了单个裂隙中的水流, 验证了单裂隙介质中地下水运动的立方定律 (Cubic Law), 即

$$q = \frac{\gamma b^3}{12\mu} J_f = \frac{\rho g b^3}{12\mu} J_f = \frac{g b^3}{12\nu} J_f \quad (1.1)$$

$$K_f = \frac{\gamma b^2}{12\mu} = \frac{g b^2}{12\nu} \quad (1.2)$$

式中 q ——裂隙内单宽流量 (L^2T^{-1});
 K_f ——单裂隙介质渗透系数 (LT^{-1});
 b ——裂隙隙宽 (L);
 J_f ——裂隙内水力梯度 (无量纲);
 μ ——地下水的动力粘滞系数 ($ML^{-1}T^{-1}$);
 g ——重力加速度 (LT^{-2});
 ν ——地下水的运动粘滞系数 (L^2T^{-1});
 γ ——地下水的容重 ($ML^{-2}T^{-2}$);
 ρ ——地下水的密度 (ML^{-3});

此后, Louis (1967, 1970)、Knezhko (1975)、Neuzzl (1981)、Witherspoon (1981)、Moreno (1988) 先后提出了粗糙面单裂隙中地下水渗流公式, 在式 (1.1) 基础上增加了裂隙粗糙度的修正系数 f , 具体表达式为

$$q = \frac{g b^3}{12\nu} \cdot \frac{1}{f} \cdot J_f \quad (1.3)$$

在此基础上, 裂隙系统渗流问题的研究也日趋深入, 主要涉及岩体裂隙渗流模型研究和岩体裂隙水力学参数确定等方面。

岩体裂隙网络系统渗流模型的研究, 目前可以概括为五类: 双重介质模型、等效连续多孔介质模型、离散裂隙网络统计模型、管道水力学模型和热—机械—水力耦合模型, 其中前三类较为重要。

(1) 双重介质模型 (Double Porosity Media Model)

双重介质模型是由前苏联学者 G.Barenblatt 于 1960 年首先提出的, 该模型同时考虑裂隙和岩块孔隙, 把裂隙介质看成是由裂隙介质和孔隙介质两种介质组成的一种连续介质, 以裂隙介质导水、孔隙介质储水为特征, 其数学模型为

$$K_p \left(\frac{\partial^2 H_p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H_p}{\partial z^2} \right) = S_s^p \frac{\partial H_p}{\partial t} - \alpha (H_p - H_f) \quad (1.4)$$

$$K_f \left(\frac{\partial^2 H_f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_f}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H_f}{\partial z^2} \right) = S_s^f \frac{\partial H_f}{\partial t} + \alpha (H_p - H_f) \quad (1.5)$$

式中 K_p 、 K_f 、 S_s^p 、 S_s^f 、 H_p 、 H_f ——分别为孔隙岩块和裂隙介质的渗透系数 (LT^{-1})、储水系数 (L^{-1}) 和地下水水头 (L);

——孔隙岩块与裂隙介质之间的水量交换系数, 可近似由裂隙介质渗透系数 K_f 和裂隙组平均间距 L 求得, 即

$$\alpha = \frac{K_f}{L^2} \quad (1.6)$$

此外, Duguid (1977), Streltsova (1977), Warren (1963), Huyakom (1983), Neretnieks (1984) 和 Dykhuizen (1990) 也先后通过对裂隙介质渗流特性的研究, 分别建立了类似的双重介质渗流模型, 促进了裂隙介质双重介质渗流模型向成熟方向的发展。

(2) 等效连续多孔介质模型 (Equivalent Continuum Porous Media Model)

等效连续多孔介质模型是美国加州大学劳伦斯伯克利研究所的学者经多年研究后提出的。他们认为, 裂隙含水介质中的水流, 可以处理为连续多孔介质中的水流。在此基础上, 几乎所有裂隙介质中地下水渗流问题的分析, 都可假定用一个等效的连续多孔介质来表征裂隙介质, 从而可以用传统的孔隙介质渗流理论来求解裂隙系统中的地下水渗流问题。

在实际情况中如何将裂隙含水岩体视为等效连续多孔介质, 该模型认为, 如果裂隙含水岩体的方向渗透率是一个光滑的渗透椭圆, 则其有一个对称的渗透度张量, 可视为连续等效多孔介质。同时在视裂隙含水岩体为等效连续多孔介质时, 还需考虑裂隙介质的均质性问题。对此, Hubbert (1956), Bear (1972) 和 Freeze 等提出了裂隙介质的特征体元 (REV) 概念, 认为在 REV 这个尺度限定范围内可把介质看成是均匀的。

在此类模型的研究中, Marcus (1961, 1962) 和 Bear (1972) 通过对裂隙介质方向渗透率的实验室研究给出了流量方向和梯度方向上的渗透率计算公式。Long 和 Witherspoon (1985) 提出了用回归方法定量分析裂隙介质方向渗透度, 并确定了视其为等效连续多孔介质的指标。

(3) 离散裂隙网络统计模型 (Fractured Network Statistical Model)

离散裂隙网络统计模型把裂隙介质看成是由按几何形态有规律分布的裂隙结构面和岩块组成, 其中岩块的渗透性极弱, 可忽略不计。在这类模型中, 主要用裂隙水力学参数和几何参数 (裂隙产状、裂隙间距、裂隙迹长和隙宽等) 来表征裂隙介质空间结构的渗透性, 考虑了裂隙的大小、形状和位置。

根据裂隙几何形态观测资料, 确定裂隙网络渗流模型的方法主要有两类:

第一类假定裂隙系统是由几组产状与间距固定、无限延伸的结构面构成的连续网络。这类模型研究较多, 以前苏联学者 Pomm (1966)、美国学者 Snow (1965, 1969, 1972)、法国学者 Louis 和 Wittke (1969, 1970) 为主要代表。他们在单个无限延伸裂隙渗透性研究基础上, 创立了裂隙介质渗透张量理论, 即假定在由不同方向裂隙组相互连通所形成的裂隙网络中, 其中某一方向裂隙组中的裂隙水流可不受其他裂隙组中裂隙水流的干扰, 提出了裂隙介质渗透张量模型

$$K_i = \sum_{j=1}^n \frac{b_j^3 \cdot S_j}{12\mu^j} \left[I - \left(\vec{n}_j, \vec{n} \right) \right] \quad (1.7)$$

第二类研究主要针对有限延伸裂隙所构成的非连续裂隙网络。就目前现状而言, 这类研究还很少。其中 Parsons 在发现非连续裂隙网络某一方向上渗透率的增加将导致另一方向上的渗透率也同步增加这一现象的基础上, 首先提出了非连续裂隙网络连通性对其渗透性起着决定作用, 同时指出决定裂隙系统内部相互连通程度的基本要素是裂隙系统的统计参数——裂隙组产状、迹线长度和间距值。此后, Rouleau 和 Gale (1985) 通过对裂隙连通程度的专

门研究,给出了表征两组裂隙之间相互连通程度的经验连通度指数 I_{ij} 。Witherspoon (1981) 和 Long (1982) 通过利用 Monte-Calo 方法模拟生成裂隙网络,得出不同方向上的导水系数,再进而求取裂隙网络渗透张量 K_{ij} 。Oda (1985, 1986) 则基于综合统计分析理论求取了非连续裂隙网络渗透张量 K_{ij} 。

我国对不考虑变形条件下裂隙介质渗透特性的研究起步比较晚,始于 80 年代,但发展速度较快。第一个系统研究裂隙介质渗流问题的田开铭教授,1980 年撰写了第一篇有关裂隙介质渗流研究的文章“对裂隙岩石渗透性的初步探讨”。此后又指导研究生杨立中教授 (1983) 对非均质各向异性裂隙含水介质研究方法进行了探讨,首次将渗透张量理论应用于山西榆次地区三迭系砂岩裂隙含水介质的分析研究,得到了理想的效果。在此基础上,又与其研究生万力教授 (1989) 通过总结几年的研究成果,合作撰写了我国学者第一部系统介绍裂隙介质渗流问题的专著《各向异性裂隙介质渗透性的研究与评价》,并把这些理论应用到了渗流研究的工程实践中。此后,沈继芳及其合作者 (1989) 在系统研究北京西山奥陶系碳酸盐岩裂隙网络连通性基础上,提出了表述非连续裂隙网络连通程度的定量指标——连通度 D ,给出了经验计算式。王恩志 (1991) 通过对裂隙介质渗流模型的系统研究,提出了“似双重介质”渗流模型。王恩志又于 1992 年在用集合函数和数值矩阵将裂隙系统的空间展布形象表述的基础上,建立了新的裂隙网络地下水渗流模型,并对有阻水裂隙存在所造成的非连通裂隙网络渗流问题,给出了相应的解决方法。此外,毛昶熙、张有天、吴旭君等学者也对裂隙介质渗流问题进行了系统研究,得出了有益的结论。

(二) 变形条件下裂隙介质渗流特性的研究

随着人类工程实践的逐步深入,人们注意到在研究裂隙介质渗流特性时,裂隙介质变形对其有着一定程度的影响作用,于是便开始了裂隙介质中渗流场与应力场之间耦合作用的研究。

裂隙介质渗流场与应力场之间存在的耦合作用,主要表现在以下两个方面:

(1) 当裂隙介质中有渗流发生时,地下水渗流在岩体中引起的渗流体积力(包括动水压力和静水压力)将改变岩体中的原始应力状态;同时,地应力和人类工程干扰力及其它外部荷载对裂隙介质的作用,也将改变岩体中的应力状态。

(2) 裂隙介质中应力状态的改变,又将影响岩体结构的改变,进而改变裂隙介质的渗透性能。

以上两方面的相互作用通过裂隙介质渗透性能及其改变而联系起来,当有渗流发生时,这两种作用将通过反复耦合而达到动态稳定。

裂隙介质渗流场与应力场耦合的研究始于 20 世纪 60 年代后期,主要是考虑了应力场的改变对裂隙介质渗流特性的影响作用,并得出了一系列表述裂隙介质渗透系数 K 随法向正应力发生变化的经验关系式。

Snow (1968) 通过试验得出一组平行裂隙在应力作用下的 K 值表达式

$$K_f = K_f^0 + \left[\frac{K_n (2b)^2}{S(\sigma - \sigma_0)} \right] \quad (1.8)$$

式中 K_f^0 —— $\sigma = \sigma_0$ 时的渗透系数 (LT^{-1});

K_n —— 裂隙面法向刚度;

B ——裂隙隙宽 (L);

S ——裂隙隙间距 (L).

Louis (1974) 根据某坝址钻孔抽水试验资料分析, 提出了渗透系数 K_f 与有效正应力的经验关系式

$$K_f = K_f^0 \exp(-\alpha\sigma) \quad (1.9)$$

式中, K_f^0 为 $\sigma = 0$ 时的渗透系数 (LT^{-1}); α 为待定系数。

此外, Jone (1975)、Witherspoon (1975)、Runchal (1980)、Kilsall (1984)、Rudolph (1991) 和 Witte (1991) 等人也研究了正应力与裂隙介质渗透性之间的关系。

以上正应力与裂隙介质渗透性关系的研究标志着裂隙介质中渗流场与应力场耦合作用的起步。此间, 日本学者 Ohnishi (1982) 和美国学者 Noorishad (1982) 对应力场与渗流场耦合作用概念的正式提出, 使这一领域的研究得以深入。之后, 德国学者 Erichsen 从岩体裂隙压缩及剪切变形分析出发, 建立了应力与渗流之间的耦合关系。Oda (1986) 应用统计分析方法由裂隙几何张量来统一表述岩体渗流与变形之间的关系。Nolte 用与裂隙压缩量有关的指数公式表述裂隙渗流与应力之间的关系。N. Barton 等 (1985) 在综合研究裂隙力学性质模型 (包括法向闭合模型和剪切扩容模型) 的基础上, 提出了有效应力与裂隙变形及岩体渗透率之间的耦合关系, 其中有: a. 正应力—闭合度—渗透率的耦合关系; b. 剪应力—扩容—渗透率的耦合关系。Olsson (1993) 把旋转剪切试验与几何径向流结合起来, 通过试验研究, 得到了压缩剪切条件下岩体裂隙的法向变形与裂隙中的流体流速同为剪切位移量的函数。

我国学者在这一领域的研究起步于 80 年代中期, 刘继山 (1987, 1988) 通过对单条裂隙和正交裂隙受正应力作用的渗流规律进行了试验研究, 得出了相应的渗透系数与正应力关系表达式。同时, 在总结前人资料的基础上, 提出了对各向异性裂隙介质, 可假定应力主方向与渗透主方向一致, 每个主渗透系数单独受其它两个方向上的主应力影响, 即

$$\begin{cases} K_1 = \frac{1}{2} \left[\frac{A}{(\sigma_2 + T)} + \frac{A}{(\sigma_3 + T)} \right] \\ K_2 = \frac{1}{2} \left[\frac{A}{(\sigma_1 + T)} + \frac{A}{(\sigma_3 + T)} \right] \\ K_3 = \frac{1}{2} \left[\frac{A}{(\sigma_1 + T)} + \frac{A}{(\sigma_2 + T)} \right] \end{cases} \quad (1.10)$$

式中, A 、 N 、 T 为试验参数, 取决于岩石类型。

李世平 (1994) 通过对殷庄砂岩全应力应变过程中渗透率变化规律的大规模系统试验研究, 得到了岩石渗透系数与全应力应变过程的函数关系式。伍法权 (1993) 应用统计岩体力学研究方法, 分别给出了单条裂隙及裂隙网络中任一条裂隙在不同法向应力和埋深条件下的隙宽变化关系式, 并以自重应力场为例, 建立了岩体渗透张量随深度变化的负指数关系式。仵彦卿 (1995) 在系统总结国内外有关渗流场与应力场耦合研究成果基础上, 通过试验研究, 分别给出了单条裂隙受压应力、剪应力及剪应力与压应力合力作用时地下水的渗流计算式。

在渗流场与应力场耦合作用的研究中, 由于渗流场对应力场的影响作用是一个非线性高度复杂的动态过程。具体表现为地下水运动的非稳定性, 导致其所引起的作用于裂隙介质的

静水压力和动水压力极为复杂；同时由于地下水对裂隙介质的化学溶蚀、机械破坏是一个长期的缓慢过程，所以这一方面的研究还处于一个很低的水平。我国学者对此做了一定的工作，许学汉（1991）在煤矿突水预报研究中，对地下水渗流引起地质结构面扩展的作用机制进行了较为详尽的研究探讨，得出了有益的结论。

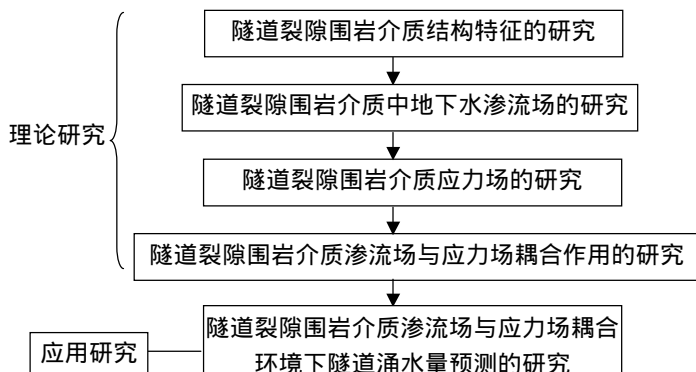
通过以上对裂隙含水介质渗流规律国内外研究现状的调研，可以看出，尽管该领域的研究起步较晚（国外始于20世纪60年代，而国内则起步于80年代），难度大，但国内外学者经过几十年的研究，取得了显著的进展。具体表现在从单裂隙渗流试验研究发展到对裂隙网络系统的物理模拟、数学模型及其计算方法研究；从不变形岩体裂隙介质的地下水渗流研究，到考虑应力耦合作用下的岩体裂隙介质中地下水渗流问题的研究。对于该领域来说，同时考虑应力场乃至温度场及化学场等多场耦合作用下的裂隙介质渗流问题研究将是今后一段时期内的主要研究方向。

第二节 研究工作的选题、研究技术路线及创意

就目前铁路勘测设计而言，对隧道涌水量预测的研究主要是基于不考虑围岩介质变形条件下的水文地质类比法和解析法。这两种方法虽然在一定程度上可以满足隧道工程实践的要求，但其自身存在的不足之处日益明显，主要表现在：一是计算模型概化过于简单，不能代表真实的围岩渗流情况；二是视围岩裂隙介质为近刚性体，对于实际隧道围岩介质尤其是特长大埋深隧道围岩介质是不符合实际情况的。

上述状况表明，裂隙介质渗流理论的发展与隧道涌水量预测研究是极不匹配的。为了弥补这一领域内研究工作的不足，结合国家自然科学基金项目《大型地下工程中地质灾害发生机理的双场耦合效应研究》（49872082）和铁道部“九五”重点科研项目《秦岭特长隧道涌水量预测预报的研究》，笔者选定了“渗流场与应力场耦合环境下隧道涌水量预测的研究”这一课题，试图将裂隙介质渗流理论中有关渗流与应力耦合理论引入到隧道涌水量预测研究中，并应用近年来发展比较迅速的数值算法对裂隙围岩介质隧道涌水量进行模拟计算，以期能更好地适应目前山区铁路隧道勘测设计、施工以及运营管理的需要。

根据上面的选题，笔者选定了如下的研究技术路线：



在此研究技术路线基础上，以研究工作在建设（文）（文）康线秦岭特长隧道为研究

对象，在特长大埋深隧道特殊的地质环境下，考虑裂隙岩体渗流场与应力场的耦合作用，对隧道水环境进行预测，研究成果主要创意在：

(1) 系统提出了隧道裂隙介质中水环境研究的工作程式；

(2) 考虑渗流场与应力场的耦合作用对隧道水环境进行研究，并在研究中提出了不同于前人的耦合模式，即在渗流场对应力场影响作用研究中，将渗流作用力（包括静水压力 p_s 和动水压力 p_d ）作为点集中荷载进行计算；

(3) 在隧道裂隙岩体渗流场研究方面，首次将三维有限单元数值模拟方法引入进行计算，取得了较好的效果。

第二章 隧道裂隙岩体的 结构特征研究

隧道裂隙岩体是一种自然历史物体，位于一定的地质环境之中，是在各种宏观地质界面（断层、节理或裂隙、破碎带、接触带、片理等）分割下形成的有一定结构的地质体。由于上述各种宏观地质界面（又称不连续面或结构面）的不规则延伸交切，构成了岩体独特的裂隙网络结构，进而控制了裂隙岩体的各种力学及水力学行为。因而，对裂隙岩体网络结构特征的研究，成了对裂隙岩体水力学及力学特性研究的基础。

第一节 裂隙岩体结构的基本特征

裂隙岩体是地质体一部分，它由结构面（断层、节理或裂隙、破碎带、接触带、片理等）和被结构面切割成的岩块结构体构成。裂隙岩体中结构面和结构体的排列组合方式构成了裂隙岩体的岩体结构特征，因而，结构面和结构体又被称为岩体结构中的两大要素或岩体结构单元。

一、结构面

结构面是指岩体内开裂的和易开裂的地质界面，包括断层、节理或裂隙、破碎带、接触带和片理等。它常充填有一定的物质，具有一定的张开度，不等同于几何学中真实的面。在地质实体中，结构面是由一定的物质组成的，例如节理和裂隙是由两个面及面间充填的水或气的实体组成的；而断层及层间错动面是由断层上下盘两个面及面间充填的断层泥和水（气）构成的地质实体组成的。

（一）结构面的成因

裂隙岩体内结构面按成因可分为三种基本类型：

（1）原生结构面：指在岩体形成过程中形成的结构面。如岩浆岩冷却收缩时形成的原生节理面、流动构造面；沉积岩体内的层理面、不整合面；变质岩体内的片理、片麻理构造等。这类结构面除岩浆岩中的原生节理面外，其余多为非开裂式的，即结构面内存在着大小不等的联接力。

（2）次生结构面：指在地质外营力作用下产生的风化裂隙面及卸荷裂隙面等，常见于边坡中。这类结构面多为张裂隙，结构面不平坦，产状不规则，连续性差，延展性不大。

（3）构造结构面：指在岩体形成后地壳运动过程中，由于地质内营力作用而在岩体内产

生的各种破裂面，包括断层面、错动面、节理面或裂隙面及劈理面等。这类结构面是岩体内结构面的主要组成部分，彼此间存在着一定的内在联系，是岩体结构中的主要研究对象。

(二) 结构面的结合特征

结构面按结合特征可分为两类：

(1) 开裂结构面：指结构面具有一定的开裂度，是结构面的主要组成部分。

(2) 闭合结构面：指结构面不具有开裂度，这类结构面可分为两种：a. 弱胶结的，如层理、片理等，其易开裂；b. 压力愈合的，又称为隐节理或微节理。

(三) 结构面充填情况及其力学属性

根据结构面充填情况及力学属性，结构面可分为：

(1) 软弱结构面：指夹有一定厚度软弱物质的结构面，如断层破碎带、层间错动面等。

(2) 坚硬结构面：指无充填物质或夹有少量坚硬碎屑的结构面，如节理或裂隙、劈理等。

(四) 结构面的等距性、贯通性

现场地质调查及室内试验结果表明，破裂构造显现出一定的等距性分布，且限定于同级序的结构面之中。对层状岩体等级序的节理统计表明，节理间距与其所切穿的岩层厚度密切相关，节理间距大体上等于所切割岩层厚度的 $1/2 \sim 2$ 倍，多数为 1 倍。岩浆岩亦有类似的等距性分布规律。结构面等距性分布规律是将地质信息抽象为地质模型及力学模型的依据，在裂隙岩体结构分析中具有重要的指导意义。

结构面的贯通性（延展性）是一个相对概念，需与一定的岩体尺度相联系。根据实际工程特征规模及结构面级序，可将断层、层间错动及劈理视为贯通性结构面；而将节理或裂隙的贯通性分为三类：a. 贯通切割节理或裂隙模型；b. 不贯通切割节理或裂隙模型；c. 贯而不通节理或裂隙模型。

表 2.1 结构面分级及其特征（据黄运飞，1992）

级序	分级依据	力学效应	力学属性	地质构造特征
级	结构面延长几千米至几十千米以上，贯通岩体，破碎宽度达数米至数十米	1. 形成岩体力学作用边界； 2. 岩体变形和破坏的控制条件； 3. 构成独立的力学介质单元	1. 软弱结构面； 2. 构成独立的力学模型— 软弱夹层	较大的断层
级	延展规模与研究的岩体相当，破碎带宽度较窄，几厘米至数米	1. 形成块裂体边界； 2. 控制岩体变形和破坏方式； 3. 构成次级地应力场边界	软弱结构面	小断层、 层间错动
级	延展长度短，从十几米至几十米，无破碎带，面内不夹泥，有的具有泥膜	1. 参与块裂岩体切割； 2. 划分一级岩体结构类型的重要依据； 3. 构成次级地应力场边界	多数属坚硬 结构面，少数属 软弱结构面	不夹泥大节 理或小断层 开裂的层面
级	延展短，未错动，不夹泥，有的呈弱结合状态	1. 划分岩体二级结构类型的基本依据； 2. 是岩体力学性质、结构效应的基础； 3. 有的为次级地应力场边界	坚硬结构面	节理、劈 理、层面、 次生裂隙
级	结构面小，且连续性差	1. 岩体内形成局部应力集中； 2. 岩块力学性质结构效应基础	坚硬结构面	不连续的 节理、隐裂 隙、层面、 片理面

(五) 结构面级序

工程实践涉及的裂隙岩体是有一定规模的,为了准确把握结构面对岩体工程的影响,可按其分布规律和力学效应将其划分为表 2.1 所示的五级二类。其中、级属于软弱结构面、级属于坚硬结构面。

二、结构体

岩体被结构面切割成的岩石块体或分离块体称为结构体,结构体的特征可通过其形状、块度及级序而表现出来。根据结构面与结构体之间的特殊概念关系,可以看出它们是相互依存的,主要表现在三个方面:结构体形状受结构面组合情况的控制;结构体块度或尺寸与结构面间距密切相关;结构体级序与结构面级序具有相互依存关系。

(一) 结构体级序

结构体级序主要依据切割成结构体的结构面类型或级序及结构体块度。对于一般的工程裂隙岩体,与切割成结构体的结构面类型相对应,结构体可分为两级:

(1) 级结构体:被软弱结构面切割成的大型岩体,亦即由于断层和层间错动带切割成的结构体。

(2) 级结构体:被坚硬结构面切割成的小型岩块,即由各种节理或裂隙、层理面和劈理面切割成的小型结构体。

(二) 结构体形状

根据结构面的组合情况,切割成的结构体形状大致有四类(见图 2.1):

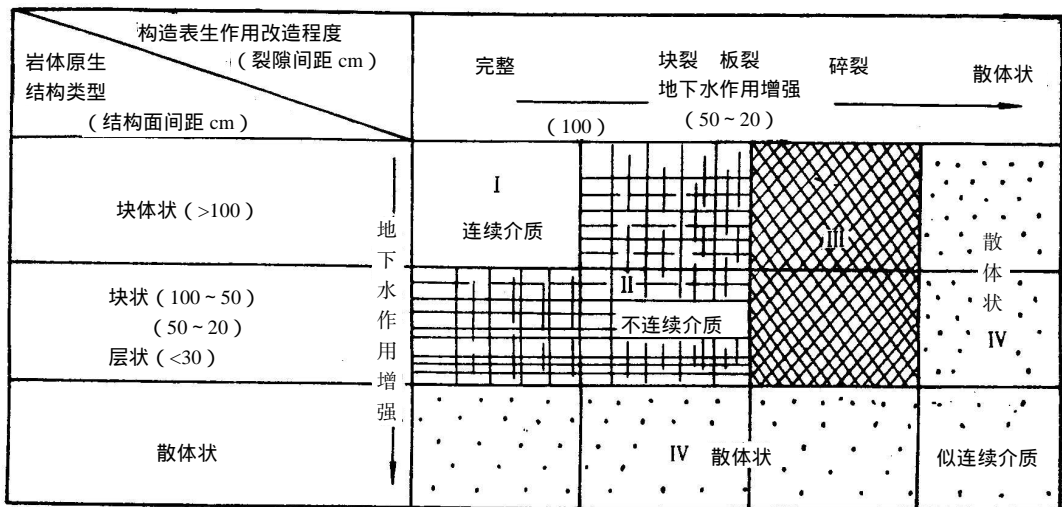


图 2.1 岩体结构类型分析图解

—完整状结构; —块状、层状结构(细分为层状、薄层状、互层状);
—碎裂状结构; —散体状结构