

文章编号:1001-5485(2009)09-0035-04

地应力对采动裂隙岩体渗流特性影响的研究

孙玉杰¹, 邬爱清¹, 张宜虎¹, 武涛²

(1. 长江科学院 水利部岩土力学重点实验室, 武汉 430010; 2. 中国地质大学 工程学院, 武汉 430074)

摘要:岩体总是赋存于一定的渗流场和应力场中的,在裂隙岩体中开挖洞室将打破最初的平衡状态,引起渗流场和应力场发生变化,因此研究地应力场对渗流场的影响具有重要的意义。采用 UDEC 程序,利用数值试验的方法,研究了块体边界尺寸以及初始地应力对在节理裂隙岩体中开挖洞室引起隧洞内涌水量变化的影响。结果表明,随着块体边界尺寸和初始应力比的增加,开挖后隧洞内的涌水量均减小。

关键词:地应力;地下洞室;渗流;节理岩体

中图分类号:TU459.4 **文献标识码:**A

1 概述

随着国民经济建设的迅猛发展,基本建设规模的不断扩大,人类的活动空间越来越大,使得其开发所依托的岩土体问题也越显突出,裂隙介质地下水运动规律就是其中的突出问题之一。诸如大型水利水电工程中的地下水问题、核废料的深部贮存、垃圾填埋污水下渗、输油管道渗漏造成的地下水污染问题等都与裂隙岩体的渗流有关。而岩体是受结构面的纵横切割、具有一定结构的多裂隙体,同时赋存于一定的地质环境中,地应力场和地下渗流场是岩体物理学环境中的 2 个重要组成部分。裂隙岩体渗流受应力的影响,而渗流场的改变又会影响到应力场的改变,两者相互影响、相互作用称为耦合作用。由立方定理可知,裂隙开度的变化对渗流的影响很大,而应力会直接引起裂隙开度的变化^[1]。因此,研究应力对渗流的影响具有重要的意义。目前,国内外学者多集中研究天然岩体的水力学特征,而对于受扰动后的岩体渗流特征研究较少。殷黎明、杨春和^[1]等分析了裂隙岩体渗流运动的基本规律,研究了应力对渗流作用影响的机理,并结合甘肃某工程进行了现场应力测量及高压压水试验,得出了该地区渗透系数随地应力值的增大呈负指数递减的变化规律。陈伟、阮怀宁^[2]利用自己编制的随机连续模型导入有限元程序进行了 2 场耦合分析,预测了锦屏二级水电站隧洞开挖过程中地下水的最大入渗

率。张后全、杨天鸿^[3]等应用 F-RFPA^{2D} 渗流与应力耦合分析系统,对煤层顶板随着开采的逐步进行,采动裂隙逐渐向上发展并最终与含水层连通,进而发生顶板突水的全过程进行了数值模拟,直观地显示了煤层顶板的变形、破坏过程以及渗流场在整个岩体的运移过程及其突水前后渗流场的变化情况,较好地揭示了顶板突水过程。肖江、高喜才^[4]等研究了采动过程中因顶板冒落、放顶跨落造成顶板透水的灾害机理,并结合具体工程地质条件,利用固-液耦合相似材料模拟方法对首采工作面综放开采过程进行了研究,分析了裂隙带与冒落带导水通道分布特征,总结了含水层潜水渗流规律。黄涛、杨立中^[5]在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方法。马立强、张东升^[6]等运用 FLAC^{3D} 数值软件的应力-渗流耦合系统,结合工程实践,系统分析了采动岩体的渗流矢量、渗流速度、孔隙压力及导水边界线动态发展的普遍规律和分布特征,进行了顶板突水危险区域的识别。杨会军、王梦恕^[7]应用岩体非连续介质渗流的研究成果,结合具体工程进行了最大涌水区段渗流数值模拟,模拟了各种工况条件下地下水的渗流特性以及地表水体的水位变化。

隧洞作为地下建筑物,修建过程中将不可避免地穿越不同水文地质、工程地质条件的裂隙岩体。当隧洞通过裂隙岩体的含水区段时,由于隧洞的开

收稿日期:2008-11-12;修回日期:2008-12-09

基金项目:国家重点自然科学基金项目(50509003)

作者简介:孙玉杰(1982-),男,山东临沂人,硕士,主要从事岩石力学与工程方面的研究工作,(电话)13954637126(电子信箱)sdustsyj@163.com。

挖人为破坏了原有地下水的渗流条件,使得隧洞自身成为地下水以不同形式(渗出、滴流、股流及大范围突水等)向外排泄的地下廊道,形成涌水灾害。对于大理深的越岭隧道来说,裂隙岩体处于相对较高的地应力场中,同时穿越含水区段的裂隙岩体中有地下水渗流场的存在,与地应力场构成一种特定的动态平衡体系。因此,研究地应力对隧洞开挖后裂隙岩体中渗流的影响十分必要且很有意义^[8]。Indraratna et (1998)^[9] 基于 UDEC 利用数值模型对裂隙岩体中开挖洞室所引起的洞室中涌水量开展了研究。而本文将采用数值模拟的方法讨论初始地应力比(水平地应力与垂直地应力的比值)与典型块体尺寸对裂隙岩体中开挖隧洞所引起的隧洞中总的涌水量的影响。

2 UDEC 基本算法

本文研究的重点是尝试研究裂隙岩体中开挖隧洞时,地下洞室内总的涌水量随着块体尺寸以及地应力比值如何变化。在本文研究中,利用 UDEC(ITASCA,1996)水力全耦合模型来模拟裂隙中水的流动。UDEC(Universal Distinct Element Code) 是 ITASCA 公司开发的针对非连续介质的平面离散元程序,在数学求解方式上采用了与 FLAC 一致的有限差分法。对于水力全耦合的渗流分析,当水流主要是由裂隙网络控制时,UDEC 程序是非常合适的。因此本文中假设岩石基质是不透水的,水流主要是通过水力连通的裂隙网络涌入隧洞内。有些研究者,包括 Herbert(1996),Zhang 等(1996)和 Hencher(1997)利用 UDEC 程序进行过裂隙岩体介质中的渗流模拟。UDEC 中被裂隙所包围的岩块可以被模拟为刚体或者是可变形体。UDEC 通过域分析流体在裂隙中的流动。图 1 中将域顺序标号为①~⑤,假定域内充满各向等压流体,域域之间通过接触与邻域发生作用。接触顺序标号为 A~F。域①、③、④表示节理,域②表示 2 个节理的焦点,域⑤为空洞。

不计重力时,假设流体压力在流动域中的分布是均匀的。考虑重力时,流体压力则按线性分布的静水压力计算。流体的流动是由相邻流体域的压力差决定的,其中流动域中流体压力的大小

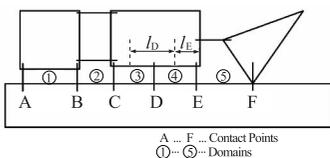


图 1 通过域模拟流体在节理裂隙中的流动
Fig.1 Flow in joint fissure modeled by flow between domains

由流动域中中心压力的大小决定。按块体接触条件的不同,裂隙岩体中流体的速率有 2 种计算方法。

(1) 点接触。点接触分为角-边接触和角-角接触,设流动域①的流体压力为 p_1 ,流动域②的流体压力为 p_2 ,则由流动域①到流动域②流体的流速为

$$v = -k_c \Delta p, \quad (1)$$

式中 k_c 为接触处的渗透系数。

$$\Delta p = p_2 - p_1 + \rho_w g (y_2 - y_1), \quad (2)$$

式中: ρ_w 为流体密度; g 为重力加速度; y_1, y_2 为 2 个流动域的中心坐标。

(2) 边-边接触。首先定义接触长度,图 1 中 l_D 和 l_E 分别为接触点 D 和点 E 的接触长度,然后利用平行板裂隙中的立方定律计算流动速度,即

$$q = -k_j a^3 \frac{\Delta p}{l}, \quad (3)$$

式中: k_j 为裂隙的渗透系数(理论值为 $1/12\mu$), μ 为流体的动力粘滞系数; l 为 2 流体域之间的接触长度; a 为接触的水力开度。

$$a = a_0 + u_n,$$

其中: a_0 为裂隙在无法向应力时的开度, u_n 为裂隙的法向开度(张开为正)。水力开度的最小值为 a_{res} ,最大值为 a_{max} 。裂隙宽度随节理法向应力的变化如图 2,图中节理法向应力 σ_n 为正时表示节理处于受压状态。

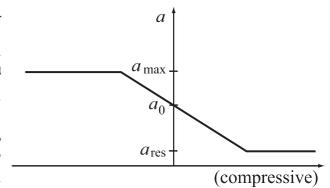


图 2 UDEC 中水力开度 a 与法向应力 σ_n 之间的关系
Fig.2 Relation between hydraulic aperture (a) and joint normal stress (σ_n) in UDEC

计算过程中,每计算一个时步,重新生成系统的几何形状,而后计算出所有接触的裂隙宽度以及所有域的体积,之后利用上面的公式计算出各接触处的流量。最后,再考虑流入域的流体流量综合以及由于周围块体的位移增量而产生的域体积的变化,按下式计算出域内的孔隙压力,

$$p = p_0 + k_w Q \Delta t / v - k_w \Delta v / v_m, \quad (4)$$

式中: p_0 为前一时步的孔隙压力; Q 为通过孔隙周围的所有接触点流入该孔隙的流量之和; k_w 为流体的体积模量; $\Delta v = v - v_0, V_m = (v + v_0) / 2$,其中, v 和 v_0 分别为现在时步和前一时步孔隙的体积; Δt 为计算时步。

计算出域内孔隙压力后,可以计算流体作用在其周围岩块的力。将该力与诸如接触点力和外力荷载等力迭加,施加在块体的节点上。这样得到不透

水岩块的总应力以及节理的有效法向应力。

3 数值试验

3.1 数值模型

本模型考虑在地表下 100 m 深处开挖直径为 6 m 的圆形隧洞,并假定地下水位在地表下 10 m 处。模型中考虑节理是 2 组连续节理,倾角(与水平方向夹角)分别为 30°和 150°(如图 3 所示)。采用节理面接触模型以及莫尔库伦模型分别用于表征节理与完整岩块的物理响应。

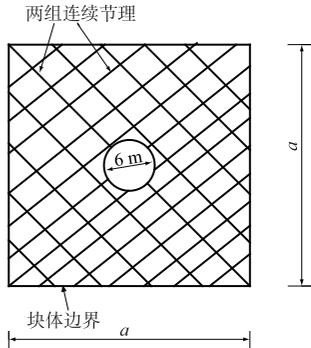


图3 含有两组节理的节理模型
Fig. 3 Joint model containing two continuous joint sets

3.2 模型岩体材料性能以及边界条件

节理模型性质见表 1。岩块、节理和孔隙流体的材料性能见表 2。

表 1 模型所采用节理参数

Table 1 Joint parameters of joint model

变量	第 1 组节理	第 2 组节理
节理倾角/(°)	30	150
节理间距/m	4.0	3.5
间隙长度/m	0	0
节理迹长/m	5.0	3.0

表 2 岩体和水的材料性质

Table 2 Material properties of rock mass and water

材料	变量	岩块	节理		流体(水)
			第一组节理	第二组节理	
岩块	体积弹性模量/($N \cdot m^{-2}$)	2.7×10^{10}			
	剪切弹性模量/($N \cdot m^{-2}$)	0.7×10^{10}			
	密度/($kg \cdot m^{-3}$)	2 500			
	粘聚力/($N \cdot m^{-2}$)	6.72×10^6			
	内摩擦角/(°)	27.0			
节理	法向刚度/($N \cdot m^{-2}$)		3.0×10^{10}	1.2×10^{10}	
	切向刚度/($N \cdot m^{-2}$)		2.0×10^{10}	1.0×10^{10}	
	裂隙渗透系数/($Pa \cdot s$)		100	100	
	摩擦角/(°)		32	31	
	初始隙宽/m		1.0×10^{-3}	2.0×10^{-3}	
	残余隙宽/m		3.0×10^{-4}	4.0×10^{-4}	
	密度/($kg \cdot m^{-3}$)				1 000
流体	动力粘滞系数/($Pa \cdot s$)				8×10^{-4}
	体积模量/($N \cdot m^{-2}$)				2×10^9

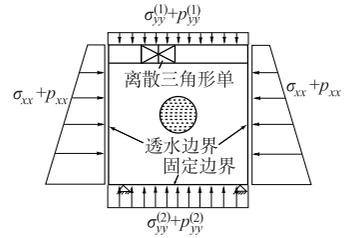


图 4 UDEC 模拟中所用的边界条件
Fig. 4 Boundary conditions applied to in UDEC model

假定的边界条件(水力边界和应力边界)如图 4 所示。流体压力

$$p_{yy} = \gamma_w y, \quad (5)$$

式中: γ_w 是水的重度, y 是距离水位的垂直距离。最初是没有水涌入开挖区域的,开挖区域内是静水压力状态。一旦隧洞开挖后,在隧洞开挖表面就会变为常量的大气压力。最初的压应力状态是由重力引起的各向同性状态。

$$\sigma_{yy} = \rho_g g y, \quad \sigma_{xx} = \alpha_1 \sigma_{yy}, \quad \sigma_{zz} = \alpha_2 \sigma_{yy}, \quad (6)$$

式中: ρ_g 为岩块密度; y 为水平面下的垂直距离; $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}$ 为 x, y, z 方向的初始应力; α_1, α_2 为初始应力比值因子,并假定在分析中保持为常量。

上面的数值试验与简单的平板之间的层流是明显不同的,平板之间的层流节理隙宽被假定为恒定的常量。当前的分析采用离散元法能够模拟出开挖引起围岩的变形对隙宽的影响,反过来,隙宽的变化又影响渗流和应力的重分布。在下一步的迭代过程中将当前的应力用于耦合的渗流-变形分析。水力耦合分析分 2 个步骤进行:第一步是通过施加相应的边界条件模型在初始应力场下达到平衡状态;第二步是假设隧洞的开挖是瞬时完成的,之后模型再次达到新的平衡状态。

在本文的研究中,对隧洞内涌水量的以下两个影响因素进行了模拟分析:①不同的块体尺寸;②不同的初始应力比(垂直应力和水平应力)。

3.3 数值试验结果分析

UDEC 数值模拟分析的结果见图 5 和图 6 所示。渗流分析是采用 UDEC 的稳定渗流分析模块进行分析的。对于给定的节理形式、块体边界尺寸以及边界条件,隧洞内的涌水量是将与隧洞外围相交的裂隙流量相加得到的。数值分析的结果表明隧洞的涌水量是随着不同的参数变量而改变的。

3.3.1 块体边界尺寸的影响

隧洞内总的涌水量大小与各种不同块体尺寸之间的关系如图 5 所示,该图表明随着块体尺寸增大,隧洞内总的涌水量在减小。原因是随着块体尺寸

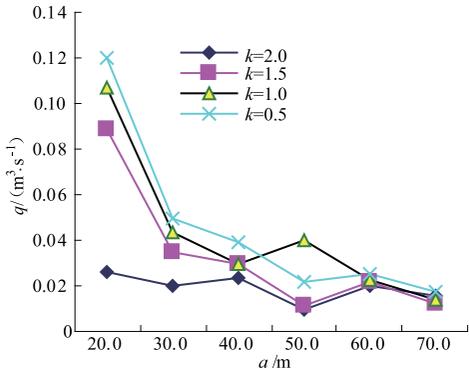


图5 块体边界大小对渗流量的影响

Fig. 5 Effects of boundary block size on flow rate for different in-situ stresses

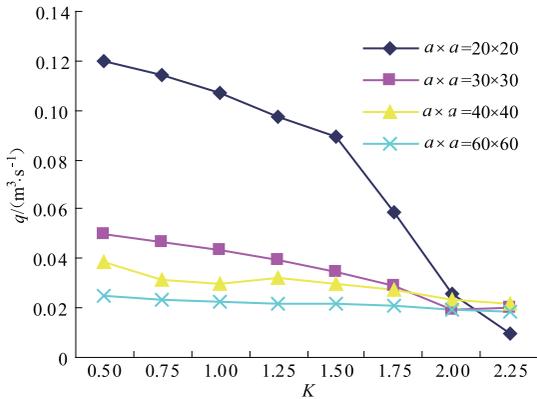


图6 初始地应力比对渗流量的影响

Fig. 6 Effect of in-situ initial stress ratio on flow rate

增大与隧洞外围相交的裂隙内水压力减小,因此隧洞内的涌水量变小。

3.3.2 初始地应力比的影响

隧洞内总的涌水量与初始地应力比 σ_h/σ_v 之间的关系如图6所示。与估计的相同,随着初始地应力比增加隧洞内总的涌水量减小。随着初始应力比从0.5到2.25的变化,隧洞内涌水量的降低值达到40%~80%。这个结果与 Indraratna 和 Wang (1996)^[11] 所做得的降低70%是相一致的。Liao 和 Hencher(1997)^[12] 利用 UDEC 对初始水平应力比、边界条件以及块体体积对裂隙岩体的渗透特征进行过模拟。他们的结果表明总的渗透系数随着初始水平应力与垂直应力的比值增加在减小。本文的分析结果与其分析是相一致的,不同之处在于本文所采用的模型以及利用涌水量代替了渗透系数。

4 结论

本文在裂隙岩体开挖隧洞中采用数值试验,得到如下结论:随着初始水平应力与垂直应力比值的增大,隧洞内的涌水量在减小;随着块体尺寸的增加

隧洞内涌水量也在减小,这与国内外学者的研究结果是相吻合的,为研究裂隙岩体的渗流规律分析打下了基础。但由于所采用的节理为贯通节理,与实际裂隙岩体中的情况还是有差距的,对渗流应力耦合的机理研究也还不够明晰,有待于进一步的研究。通过本文也证实了 UDEC 进行裂隙岩体耦合渗流分析是有效的。

参考文献:

- [1] 殷黎明,杨春和,王贵宾,等. 地应力对裂隙岩体渗流特性影响的研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005,17(24):3071-3075.
- [2] 陈伟,阮怀宁. 锦屏二级水电站裂隙岩体渗流-应力耦合分析[J]. 水力发电,2008,34(1):25-28.
- [3] 张后全,杨天鸿,赵德深,等. 采场工作面顶板突水的渗流场分析[J]. 矿井地质,2004,17(2):25-27.
- [4] 肖江,高喜才,马岳谭,等. 富水覆岩采动裂隙渗流相似模拟研究[J]. 采矿与安全工程学报,2008,25(1):50-53.
- [5] 黄涛,杨立中. 渗流与应力耦合环境下裂隙围岩隧道涌水量的预测研究[J]. 铁道学报,1999,21(6):75-80.
- [6] 马立强,张东升,缪协兴,等. FLAC^{3D}模拟采动岩体渗流规律[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版),2006,21(3):1-5.
- [7] 杨会军,王梦恕. 深埋长大隧道渗流数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(3):511-519.
- [8] 张金才,张玉桌. 应力对裂隙岩体渗流影响的研究[J]. 岩土工程学报,1998,20(2):19-22.
- [9] INDRARATNA B, RANJITH P G, AZIZ N. Numerical Prediction of Inflow to Underground Cavity Using a Coupled Hydro-Geomechanical Model[C]. International Conference on Geomechanics/Ground Control in Mining and Underground Construction, Department of Civil, Mining and Environmental Engineering University of Wollongong, Australia, 1998,(2):863-871.
- [10] ITSCA. UDEC-Universal Distinct Element Code, User's Manual[K]. Minneapolis, USA:ITSCA Consulting Group, 1996.
- [11] INDRARATNA B, WANG J C. Effects of Stress Change on Water Inflows to Underground Excavation[J]. Australian Geomechanics,2001,29:99-114.
- [12] LIAO Q H, HENCHER S R. Numerical Modelling of the Hydro-Mechanical Behaviour of Fractured Rock Masses[J]. Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. 1997,(3-4):117.