

文章编号:0559-9350(2011)05-0595-07

## 深埋隧洞开挖过程中突水与突泥的机理研究

王媛<sup>1,2</sup>, 陆宇光<sup>1,2</sup>, 倪小东<sup>1,2</sup>, 李冬田<sup>1,2</sup>

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学 隧道与城市轨道交通研究所, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 突水与突泥是隧洞施工过程中常遇的重要工程灾害之一, 本文利用离散元法, 采用颗粒流PFC3D软件, 结合流体动力学数值模拟的有限体积法, 建立了由裂隙岩体及断层组成的围岩隧洞突、涌水三维数值模型, 模拟隧洞突水、突泥的全过程; 探讨了集中水源(断层)水压力、岩体裂隙性状等对隧洞突水、突泥的影响。据此提出了工程突水、突泥预防中两个重要的概念: 突水临界水压力和前方临界突水距离。并提出了隧洞突水、突泥的发生机理, 认为突水发生的前提是存在集中的高压水源。水源压力的大小、开挖面至集中水源的距离、岩体强度、岩体裂隙性状是影响突水的主要因素。

**关键词:** 突水; 突泥; 离散元; 裂隙岩体; 颗粒流; 隧洞

**中图分类号:** TV672

**文献标识码:** A

## 1 研究背景

突涌水预测问题一直是各类地下工程中普遍遇到的难题, 无论是采矿巷道还是深埋隧洞, 突水、突泥都严重威胁着工程的施工安全。由于突水、涌水是一个复杂的与时间有关的动态过程, 影响因素众多, 如地层岩性、地质构造分布、水文地质条件、初始地应力、施工方法等, 在不同工程背景和地质条件下突水、涌水机理各异, 因此突涌水研究一直是人们关注的热点和难点。

以往突水的研究以关注煤矿突水和岩溶突水较多, 对于裂隙岩体深埋隧洞突水问题研究不多。早期常借鉴地下采矿顶、底板突水方面的研究成果, 如突水系数法<sup>[1]</sup>; “底板下三带”说<sup>[2]</sup>; 零位破裂说<sup>[3]</sup>; 岩水应力关系说<sup>[4]</sup>等。近年来有些学者对隧洞突水机理作了专门研究, 取得了一些进展。刘宝臣等<sup>[5]</sup>从突水的不同特征上将岩溶涌突水机理分为直涌型、冲溃型和劈裂型三种类型; 干昆蓉等<sup>[6]</sup>、李付法<sup>[7]</sup>采用水力劈裂理论研究了隧洞围岩破坏引起突水的机理。近期人们也开始采用基于连续介质力学的有限元法或有限差分法等数值方法研究突水机理, 如刘招伟<sup>[8]</sup>针对圆梁山隧道岩溶突水机理问题, 采用基于有限差的FLAC2D软件二维模拟了不同的隧洞岩溶交错模式, 通过分析不同隔离岩层下的塑性区扩展来研究突水机理。但是由于采用连续介质力学研究介质破碎问题的固有弱点, 该法无法直观地判断隧洞突、涌水的发生及隔离岩体破坏前后岩体渗透性的变化。同时已有的连续介质数值分析方法只能进行达西流分析, 限制了其对高水头、高流速下突水问题的研究, 既无法实现对突泥的模拟, 也无法评估不同突水事故中突泥现象的危害。

本文首次尝试采用基于离散单元算法的PFC3D软件, 利用离散元分析大变形问题的优越性以及颗粒元模拟松散物质的优势, 通过建立裂隙岩体与断裂带的岩体计算模型, 研究隧洞突水突泥的机

收稿日期: 2009-08-15

基金项目: 科技部“十一五”科技支撑计划项目(2006BAB04A06); 新世纪优秀人才支持计划(NECT-07-0253); 国家自然科学基金雅砻江水电联合研究基金(50579090)

作者简介: 王媛(1969-), 女, 教授, 主要从事岩土工程渗流理论与测试、裂隙岩体应力和渗流耦合等方面的研究。

E-mail: wangyuan@hhu.edu.cn

理, 探讨其规律。作者针对砂板岩地区深埋长隧洞高地应力、高水压的特点, 提出了突水、涌水预测中断裂构造控水的系统方法, 本文所建的机理分析数学模型即是该预测系统的一部分。

## 2 颗粒元法模拟隧洞突水、突泥机理的优势

颗粒元法的基础是离散单元法, PFC3D 软件的核心方法正是颗粒元。其基本计算单元为颗粒球与墙单元, 此外还可以增加一些特殊的组合单元如阀单元及裂隙单元等。在模拟计算时通过判断每个球单元的接触情况, 根据相互接触两个球单元的重叠量和两球位置关系计算出接触作用力, 并结合作用在球单元上的体力计算出球单元的加速度, 在已知球单元初速度与加速度的情况下运用牛顿运动定律计算出下一时步球单元的位置和速度, 并搜索判断出新接触, 如此循环, 就可以得出所有颗粒在任意时刻的位置和运动情况<sup>[9]</sup>。

利用颗粒元模拟隧洞突水, 可以较好地反映在突水发生的瞬间岩体破碎损坏的情况, 统计岩体的塌方量, 同时, 为了模拟岩块这一可破碎的连续体, 本文在建立模型时采用了一种特殊单元——粘结单元, 用以粘结原本各自独立运动的颗粒, 形成一个由颗粒粘结组成的岩块整体, 每个粘结单元具有各自的强度和刚度, 结合颗粒自身的刚度, 即可模拟出拥有各种弹性模量与强度的连续物质。当材料受力大于其强度时, 材料将发生破碎, 整块的岩石即分离成小块。这一破碎过程的模拟是传统的连续介质力学无法做到的。粘结单元有两种, 一是点粘结单元、二是平行粘结单元。前者只能传递轴力与剪力, 后者除了能传递轴力与剪力外还能传递力矩。本文模拟岩石采用的是平行粘结单元, 这种粘结单元可以模拟材料因应力状态的改变而具有不同的强度, 更加符合岩石的性质。

对于流体的模拟采用有限体积法, 可以模拟达西流与非达西流, 并能根据需要进行选择是否要在 N-S 方程中考虑重力场和流体黏度。由于颗粒元可模拟材料的可破碎性, 在材料发生破碎的同时, 材料的孔隙率也会发生相应的改变, 这就较好地模拟了隧洞突水时岩层渗透性发生的改变。

## 3 隧洞突水、突泥的数值模拟及影响因素研究

**3.1 计算模型的建立** 本文研究的目的是突水发生前后隧洞开挖面附近岩体和水流的细观动态变化, 同时考虑到计算机的计算能力, 选取裂隙岩体计算模型总尺寸为  $15\text{m} \times 15\text{m} \times 30\text{m}$ , 右侧设有一宽度为  $3\text{m}$  的含水断层, 岩体内开挖一圆截面隧洞, 洞径为  $5\text{m}$ , 隧洞开挖至距离含水断层  $5\text{m}$  的位置。岩体分为完整岩层带、过渡带和断层影响带三种区域, 厚度分别为  $4\text{m}$ 、 $6\text{m}$  与  $5\text{m}$ , 计算模型各几何尺寸如图 1 所示。

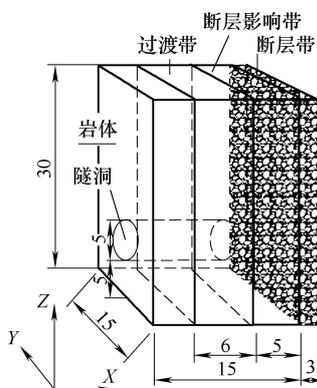


图1 隧洞突涌水模型(单位:m)

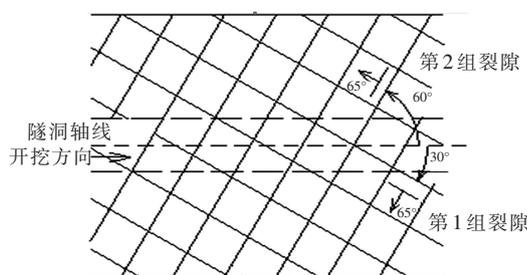


图2 岩体裂隙产状

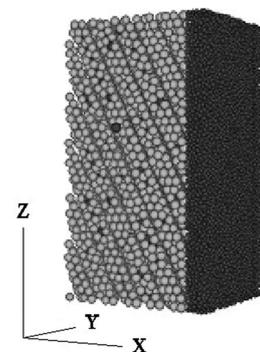


图3 PFC岩体裂隙及断层模型

裂隙岩体中还分布有透水性很好的相互正交的两组裂隙, 第一组裂隙走向与洞轴线夹角为  $30^\circ$ , 倾向逆隧洞掘进方向, 倾角  $65^\circ$ ; 第二组裂隙走向与洞轴线夹角为  $60^\circ$ , 倾向逆隧洞掘进方向, 倾角

65°，两组裂隙与隧洞轴线的关系如图2所示。图3为颗粒模型的立体示意，其中的斜条纹为岩体两组裂隙中的一组。为了更好地反映突泥现象，研究突泥时还在右侧宽度为3m的断层内充填粉砂碎石颗粒。

模型的上、下、前、后及左五个边界为固支边界，水压力作用在模型右边的断层面上。进行固体颗粒和流体的耦合分析时，各类固体材料微观参数如表1所示，流场及流体参数如表2所示。正确的参数选择是机理研究的关键，因为颗粒元不是直接赋予材料宏观参数，输入的是材料微观参数，因此微观参数的合理性需由一系列对应的数值试验来验证。分别通过数值三轴试验、巴西劈裂试验测试所模拟的3个岩带岩体的抗压强度和抗拉强度，通过数值直接剪切试验测试裂隙的抗剪强度，通过调试使其与实际岩体一致，其宏观参数值如表3所示。

为研究断层水压力和裂隙结构对隧洞突、涌水的影响，分别模拟8组不同的水压力，水压力分别为1MPa、2.5MPa、5.0MPa、7.5MPa、10.0MPa、12.5MPa、15.0MPa、20.0MPa，两组岩体裂隙平均间距分为小间距、中间距、大间距3种情况，等效的渗透系数见表2。

表1 数值模拟固体材料微观参数

试样尺寸 $W \times B \times H/m$	岩体粒 径	断层填充物粒径		平行粘半径 放大倍数	岩体颗粒粘 结强度/Pa	过渡带粘 结强度/Pa	断层影响带颗 粒粘强度/Pa	PFC计算 时步/s
15×15×30	0.5m	最大粒径 0.10m	最小粒径 0.025m	1	$4.5 \times 10^7$	$1.5 \times 10^7$	$0.6 \times 10^7$	$1.0 \times 10^{-3}$

表2 数值模拟流场参数

流体		岩体平均渗 透系数/ $(m \cdot s^{-1})$	裂隙岩体等效渗透系数/ $(m \cdot s^{-1})$			流场入口尺 寸 $W \times H/m$	流场出 口尺寸 $W \times H/m$	流体计算网格 $W \times B \times H/m$	CFD计算 时步/s
密度/ $(kg \cdot m^{-3})$	黏滞系数/ $(Pa \cdot s)$		小间距	中间距	大间距	15×30	3.0×3.0	3.0×3.0×3.0	$2.0 \times 10^{-2}$
1000	$1.0 \times 10^{-3}$	$1.01 \times 10^{-7}$	$1.57 \times 10^{-6}$	$1.11 \times 10^{-6}$	$0.73 \times 10^{-6}$				

表3 数值模型宏观参数

完整岩体无侧限 抗压强度/MPa	过渡带岩体无侧限 抗压强度/MPa	断层影响带岩体 无侧限抗压强度 /MPa	完整岩体 抗拉强度 /kPa	过渡带岩体 抗拉强度 /kPa	断层影响带岩 体抗拉强度 /kPa	裂隙抗剪 强度/kPa
118	45	22	22.5	8.9	4.2	2.0

**3.2 隧洞的突水、突泥量随时间的变化规律** 图4是采用数值模型计算出的涌水量随时间变化曲线，图中的流量在出现一个峰值后最终都能趋于一个稳定值。通过该模型计算还可以获得隧洞突水流体速度场的分布。

图5所示为突泥的模拟结果，在突水刚开始时突泥量也突然增长，当流量稳定后，突泥量增长就减缓。高水头下突泥量增长速度明显较高，反映了水力梯度越高破坏能力越强。

由以上分析可知，采用颗粒元方法分析隧洞突涌水，不仅可以得到涌水量随时间的变化规律，还可以获得突泥量的变化规律，并且可以动态地跟踪涌水量在一定水压力下的突变规律，这些皆是传统的有限单元计算方法难以实现的。该方法可模拟隧洞突水、突泥的过程和机理。

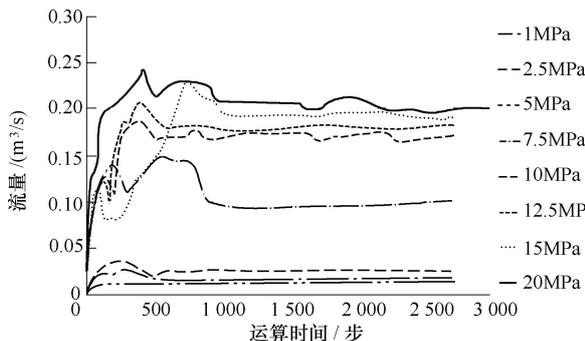


图4 隧洞突水量随时间变化

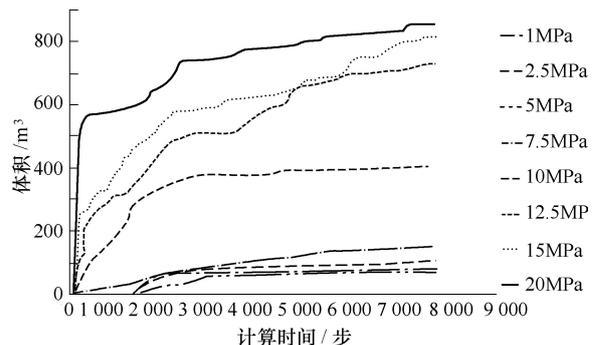


图5 隧洞突泥量随时间变化

### 3.3 断层水压力对隧洞突水、突泥的影响

3.3.1 断层水压力与隧洞涌水量关系 隧洞涌水量是隧洞突、涌水分析的重要指标，图6表示了不同裂隙密度时稳定涌水量与断层水压力之间的关系。可以看出，涌水量基本和水压力成正相关关系。随着水压力增加，岩体中水力梯度增加，涌水量也逐渐增加；当达到一定程度后，涌水量会突然增大；继而随着水压力增加而缓慢增长。对于不同裂隙密度的计算模型，皆有相似的规律。

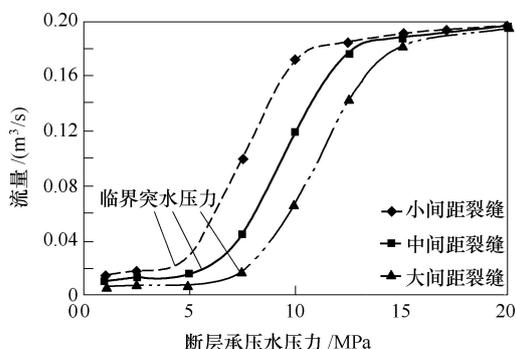


图6 隧洞稳定涌水量与断层水压力关系

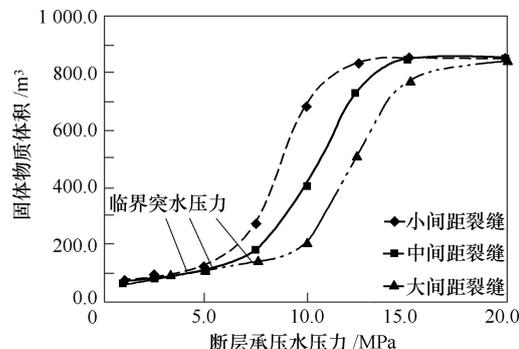


图7 隧洞突泥量与断层水压力关系

3.3.2 断层水压力与突泥的关系 图7所示为隧洞突泥固体物质总量与断层水压力之间的关系曲线。当水压力较小时，洞内有少量固体颗粒物，这时隧洞在断层水压力作用下有小规模涌水和落石发生，还没有形成大规模突涌水，这一现象可以看作隧洞将发生突涌水的先兆。随着水压力增加，断层影响带中水力梯度不断升高，涌水量增加，固体物质开始随着水流沿着一些张开裂隙涌入隧洞，形成小规模突泥(见图8)。当开挖继续进行，开挖面与断层之间的岩层承受不住巨大水压力，就发生大规模整体性垮塌(见图9)。此时突水速度很高，突水量巨大，大量固体物质与突水一起形成大的塌方。

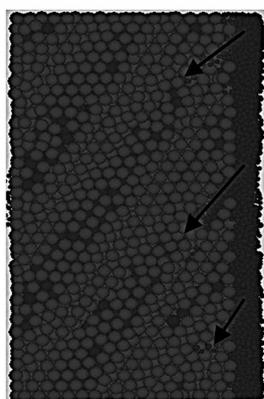


图8 低水压力时固体物质运状况

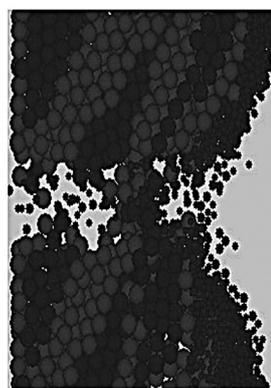


图9 破坏后隧洞开挖面破坏状况

图8中，可以观察到断层填充物质沿着岩体张开裂隙运移的状况，突泥路径在图中由箭头标出。图9中，可以看出隧洞开挖面与顶部岩体已发生严重破坏，顶部形成塌方。

3.3.3 突水临界水压力与临界突水距离 由图6、图7可见，突水流量和突泥固体物质总量发生突变时的水压力均是同一个值。实际发生突水时往往伴有突泥的产生，因此可以定义这一水压力为突水、突泥临界水压力。当断层中水压力超过这一数值，隧洞将发生突水、突泥。突水临界水压力如图6、图7中所示。

在实际隧洞施工过程中，断层中的水压力不变，但随着施工开挖的进展，岩体中水力梯度逐渐增高，涌水量也逐渐增加，达到一定程度后，涌水量和突泥量会突然增大，涌水量和突泥量发生跃升时的开挖面到充水断层的距离也是隧洞发生突水的重要特征参数，定义这一距离为临界突水距离。当开挖面到充水断层的距离小于这一数值后，隧洞将发生突水、突泥。

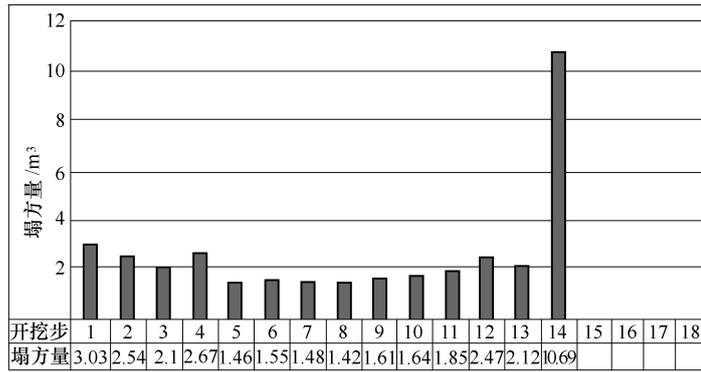


图10 隧洞塌方量随隧洞开挖变化

图10是当断层水压力为20MPa时，隧洞塌方量随隧洞开挖进程的变化图。当开挖至第14步时，塌方量突然比前一步增加了5倍以上，此时开挖面到充水断层的距离即为临界突水距离。

突水临界水压力和临界突水距离是隧洞发生突水的重要特征参数，可以用于隧洞施工中突水和与突水有关的塌方的预测预报。

**3.4 岩体裂隙结构对隧洞突水、突泥的影响** 在岩体中，张性和张剪性裂隙是地下水渗流的主要通道，其分布密度、隙宽及产状对岩体渗透性质的影响很大，从而影响洞周围岩的渗透稳定。

**3.4.1 岩体的裂隙密度对突水临界水压力的影响** 图6、图7表明，在低水压力下，涌水量及涌出固体物质质量与张开裂隙密度成正相关，这是因为在岩层没有发生整体破坏的情况下，张开裂隙是岩体的主要渗水通道，其密度直接影响了岩层的透水性。因此裂隙密度越大，岩层透水性越好，涌水量和固体物质涌出量也就越大。

随着岩体裂隙密度的增加，涌水量发生突变的临界水压力不断减小。因为裂隙密度越大，岩体的整体强度越低，岩体整体稳定性越差，越容易发生突涌水，如图6所示。

与涌水量相应，突泥固体物质也呈现出相似的变化规律，其崩落量在临界水压力附近突增。裂隙密度越大，与强崩落相对应的水压力越小，反则反之，如图7所示。

**3.4.2 裂隙产状对临界突水距离的影响** 在实际施工预报工作中，断层影响带主要裂隙(或称优势裂隙，或者砂板岩的层面裂隙)的产状，对突水发生的危险性和发生时机是有影响的。

本文分别计算了裂隙为陡倾(倾角65°)和缓倾(倾角30°)两种情况下，临界突水距离与断层中水压力的关系。图11所示为裂隙倾角分别为65°和30°时，根据分步开挖在不同水压作用下的突水距离拟合成的突水临界距离曲线。可以看出，在同一水压力下，陡倾角裂隙岩体的临界突水距离较缓倾角裂隙岩体的临界突水距离大。即陡倾角裂隙岩体在前方断层中水压力的作用下，稳定性较差；缓倾角裂隙岩体的稳定性较好些。

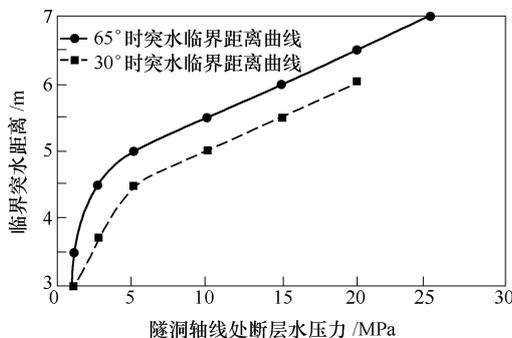


图11 不同裂隙倾角时突水临界距离

不论是陡倾角还是缓倾角的裂隙岩体，当断层中的水压力大于一定数值后，临界突水距离与水压力增长的关系呈线性关系。水压力小于该数值时，明显地不易发生突水(临界突水距离急剧减小)。在图 11 中，该数值为 5MPa。该特征值对于判别岩体是否会发生突水是有意义的。

#### 4 关于隧洞突水、突泥机理的探讨

采用颗粒流分析方法，通过构建模拟隧洞突水、突泥过程的数值模型，研究了隧洞突水、突泥的影响因素，表明充水断层等类似的集中水源的存在是发生隧洞突水、突泥的前提条件，集中水源中水压力的大小、开挖面至充水断层的距离、岩体的强度以及岩体中裂隙的性状是影响隧洞突水、突泥的重要参数。

集中水源(断层)中水压力和开挖面至充水断层的距离会影响开挖面附近的水力梯度。这种水力梯度直接影响着突水、突泥是否发生。当开挖前方断层影响带中水力梯度较小时，隧洞涌水量较小，随着开挖，水力梯度逐步提高，隧洞涌水量开始缓慢增加，当水力梯度超过某一值后，涌水量会突然增大，固体颗粒物的排出量也突然增大，因此对应发生突变的水力梯度，即水压力与开挖面至充水断层的距离之比，是研究隧洞突水、突泥机理的一个重要参数。

也就是说，对应具有一定岩体结构的岩体，当隧洞开挖面至充水断层距离一定时，必定存在着一个突水临界压力，当断层中水压力超过了这一临界值，即发生突水和突泥。从另外一个角度来看，当断层中水压力一定时，必定存在着一个临界突水距离，当隧洞开挖面至充水断层的距离小于这一临界突水距离，即发生突水和突泥。这两者间是相互关联的，在地质条件一定的条件下，一个特定的临界水压力必定对应着一个特定的临界突水距离。

岩体中的裂隙性状是影响突水、突泥的另一个重要因素。随着岩体中裂隙密度和开度的增加，及裂隙倾角的增加，发生突水、突泥所需的临界水压力将不断减小。在隧洞开挖过程中，由于应力场的改变，导致岩体结构发生变化，如裂隙的分布密度、开度、连通度增加等，从而可能加速突水、突泥的发生。

由上述可知，无论隧洞发生突水、突泥的原因是由于断层水压力值超过某一临界值，或隧洞开挖面至充水断层的距离小于某一值，或是岩体的裂隙性状发生了改变，究其本质，就是高水力梯度或高流速导致岩体发生了渗透破坏。因此隧洞发生突水、突泥的机理，实质上是岩体中存在有集中的压力水源(如充水断层或岩溶等)，由于隧洞开挖改变了水文地质的边界条件，引起岩体中高水力梯度或高流速的发生，从而导致岩体发生了渗透破坏。

#### 5 结语

本文借助于颗粒流数值分析方法，对隧洞开挖过程中的突水、突泥问题进行了探索，研究表明该法可以方便地跟踪隧洞中水体和颗粒堆积物的动态变化情况，为隧洞突水、突泥机理的研究提供了一种新的有效的途径。

岩体中集中压力水源(如充水断层)的存在是发生隧洞突水、突泥的前提条件，集中水源水压力的大小、开挖面至充水断层的距离、岩体的强度以及岩体中裂隙的分布情况是影响隧洞突水、突泥的重要参数。突水临界水压力和临界突水距离是工程突水、突泥预防中两个重要的特征参数，可以用来进行隧洞突水、突泥的预测预报，本文初步建立了临界突水距离的曲线。

地下工程突水突泥问题有岩溶突水和非岩溶突水两大类型，在研究的主要目标和方法上都有一定的差异。本文的研究依托于南水北调西线引水工程，主要研究了浅变质砂板岩岩体中深埋长隧洞的突水突泥问题。本文的研究思路是：通过建立经过验证的合适的颗粒元模型，研究一定的力学和地质、水文地质边界条件下，随着开挖，水流和颗粒流运动的规律，从而定量地评价发生突水和突泥的指标，这对于岩溶突水也是有意义的，有待进一步研究。

由于颗粒元模型数据量非常庞大,模型的大小和颗粒的大小都受到限制。本课题研究的模型主要目的是研究突水突泥的水流和颗粒流的细观动态。关于更大范围的地下水流场则由相关的大尺寸的水文地质模型进行研究,并作为颗粒流突水机理模型的背景。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] 中华人民共和国煤炭工业部. 矿井水文地质规程[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1984.
- [ 2 ] 刘宗才. 下三带理论与底板突水机理[J]. 中国煤田地质, 1991, (6): 38-41.
- [ 3 ] 王作禹, 刘鸿泉. 承压水上采煤[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1993. 1-10.
- [ 4 ] 王成绪, 邓中. 煤层开采过程中底板突水的弹塑性有限元模拟及初步分析[J]. 北京大学学报, 1990(6): 711-719.
- [ 5 ] 刘宝臣, 向志坤, 林玉山. 锦屏二级水电站隧洞工程岩溶涌突水机理[J]. 桂林工学院学报, 2008, 28(4): 484-488.
- [ 6 ] 干昆蓉, 杨毅, 李建设. 某隧道岩溶突水机理分析及安全岩墙厚度的确定[J]. 隧道建设, 2007, 27(3): 13-16, 50.
- [ 7 ] 李付法. 锦屏水电站辅助洞突水、突泥机理及预测预报研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2006.
- [ 8 ] 刘招伟. 圆梁山隧道岩溶突水机理及防治对策研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(2): 228-232.
- [ 9 ] Particle Flow Code in 3 Dimensions . PFC3D Version 3.1[M]. Itasca Consulting Group Inc, 2004.

## Study on mechanism of water burst and mud burst in deep tunnel excavation

WANG Yuan, LU Yu-guang, NI Xiao-dong, LI Dong-tian

( Hohai University, Nanjing 210098, China )

**Abstract:** Water burst is one of the main disasters in the process of tunnel excavation. The software of PFC3D based Discrete Element Method (DEM) was A 3D numerical model including fractured rock and fault has been established. The whole process of water burst and collapsing due to tunnel excavation was simulated by using DEM and Computational Fluid Dynamics (CFD). The influence of fault's hydraulic pressure and fracture condition in rock on the quantity of water burst or collapsing was discussed. Two new conceptions—critical hydraulic pressure of water source and critical distance between excavation surface and water source were proposed. Finally, the mechanism of water burst and collapsing are concluded, i.e. the existence of water source with high water pressure is necessary for the occurrence of water burst, and pressure value of water source, distance between excavation surface and water source, and the mechanical property of rock and the fracture condition in rock mass are the main influencing factors.

**Key words:** water burst; collapsing; DEM; fractured rock mass; particle flow; tunnel

(责任编辑: 李琳)