

11-25-2023

## Dynamic prediction method of tunnel water inflow based on detailed depiction of complex geological bodies

DU Yajun

*Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China; Key Laboratory of Water Management and Water Security for Yellow River Basin, Ministry of Water Resources (Under Construction), Zhengzhou 450003, China; School of Water and Environment, Chang'an University, Xi'an 710054, China, zhuyuanpiaolang@126.com*

LI Qingbo

*Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China*

WAN Weifeng

*Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China, wwfmt@163.com*

*See next page for additional authors*

Follow this and additional works at: <https://cge.researchcommons.org/journal>



Part of the [Earth Sciences Commons](#), [Mining Engineering Commons](#), [Oil, Gas, and Energy Commons](#), and the [Sustainability Commons](#)

---

### Recommended Citation

DU Yajun, LI Qingbo, WAN Weifeng, et al. (2023) "Dynamic prediction method of tunnel water inflow based on detailed depiction of complex geological bodies," *Coal Geology & Exploration*: Vol. 51: Iss. 11, Article 8. DOI: 10.12363/issn.1001-1986.23.01.0052

Available at: <https://cge.researchcommons.org/journal/vol51/iss11/8>

This Hydrogeology, Engineering Geology, Environmental Geology is brought to you for free and open access by Coal Geology & Exploration. It has been accepted for inclusion in Coal Geology & Exploration by an authorized editor of Coal Geology & Exploration. For more information, please contact [380940179@qq.com](mailto:380940179@qq.com).

---

# Dynamic prediction method of tunnel water inflow based on detailed depiction of complex geological bodies

## Authors

DU Yajun, LI Qingbo, WAN Weifeng, YANG Fengwei, LI Yazhe, and QIAN Hui



移动阅读

杜亚军, 李清波, 万伟锋, 等. 基于复杂地质体精细刻画的隧洞涌水量动态预测方法[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(11): 65-73. doi: 10.12363/issn.1001-1986.23.01.0052

DU Yajun, LI Qingbo, WAN Weifeng, et al. Dynamic prediction method of tunnel water inflow based on detailed depiction of complex geological bodies[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(11): 65-73. doi: 10.12363/issn.1001-1986.23.01.0052

# 基于复杂地质体精细刻画的隧洞涌水量动态预测方法

杜亚军<sup>1,2,3</sup>, 李清波<sup>1</sup>, 万伟锋<sup>1</sup>, 杨风威<sup>1</sup>, 李亚哲<sup>1,2</sup>, 钱 会<sup>3</sup>

(1. 黄河勘测规划设计研究院有限公司, 河南 郑州 450003; 2. 水利部黄河流域水治理与水安全重点实验室(筹), 河南 郑州 450003; 3. 长安大学 水利与环境学院, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 在隧洞涌水量预测数值模拟中, 准确刻画倾斜断层、倾斜隧洞等不规则地质体和地下构筑物是一个难题, 且预测时通常假定隧洞开挖瞬间完成, 而未考虑施工进度。通过解决三维地质模型与三维地下水数值模型耦合过程中要求的非自相交性和密封性问题, 提出一套基于复杂地质体精细刻画的隧洞涌水量动态预测方法。首先在三维地质建模软件中构造倾斜隧洞、竖井、倾斜断层和不规则地质体的密封性界面, 其中倾斜隧洞和竖井需根据开挖进度分段构建, 进而建立三维地质体模型。随后将三维地质模型数据以 ml 文件格式导入三维地下水模拟软件 Feflow, 利用 Feflow 的完全非结构化网格功能实现对复杂地质体的精细剖分。最后在 Feflow 精细剖分复杂地质体的基础上, 将隧洞边界设置为第三类边界, 通过设置交换系数与参考水头, 实现考虑隧洞开挖进度和施工工艺(如注浆、衬砌等)的隧洞涌水量动态预测。将本方法应用于某地下工程倾斜隧洞与竖井的涌水量计算, 实际效果较好。

**关键词:** 隧洞涌水量; 倾斜断层; 三维地质模型; 完全非结构化网格; 水量动态预测

**中图分类号:** P641.69 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1986(2023)11-0065-09

## Dynamic prediction method of tunnel water inflow based on detailed depiction of complex geological bodies

DU Yajun<sup>1,2,3</sup>, LI Qingbo<sup>1</sup>, WAN Weifeng<sup>1</sup>, YANG Fengwei<sup>1</sup>, LI Yazhe<sup>1,2</sup>, QIAN Hui<sup>3</sup>

(1. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China; 2. Key Laboratory of Water Management and Water Security for Yellow River Basin, Ministry of Water Resources (Under Construction), Zhengzhou 450003, China; 3. School of Water and Environment, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** It is a challenge to accurately characterize the irregular geological bodies and underground structures such as inclined faults and inclined tunnels during the numerical simulation of tunnel water inflow prediction, and the prediction generally assumes that the tunnel excavation is completed instantaneously without considering the construction progress. A dynamic prediction method for tunnel water inflow based on precise characterization of complex geometric bodies was proposed by addressing the non-self-intersection and watertight issues required in the coupling process of three-dimensional (3D) geological models and 3D groundwater numerical models. Specifically, a sealed boundary interface of inclined tunnels, shafts, inclined faults and irregular geological bodies is firstly constructed in 3D geological modeling software. The inclined tunnels and shafts need to be segmented according to the excavation progress, and then a 3D geological model is established. Subsequently, the 3D geological model data is imported into the 3D groundwater simulation software, Feflow, in ml file format. Then the fully unstructured grid function of Feflow is used to achieve the fine gridding of the complex geometric bodies. Finally, the tunnel boundary is set as a third type boundary based on the de-

收稿日期: 2023-02-20; 修回日期: 2023-08-30

基金项目: 水利部重大科技项目(SKS-2022062); 河南省重点研发与推广专项科技攻关项目(212102311150); 黄河勘测规划设计研究院有限公司自主研发项目(2019BSHZL03, 2020-ky02, 2020-ky15)

第一作者: 杜亚军, 1988年生, 男, 河南新乡人, 博士, 工程师, 从事水利水电工程地质与水文地质勘察研究工作。

E-mail: zhuyuanpiaolang@126.com

通信作者: 万伟锋, 1981年生, 男, 河南许昌人, 博士, 正高级工程师, 从事水利水电工程地质与水文地质勘察研究工作。

E-mail: wwfmt@163.com

tailed gridding of complex geometric body in Feflow. Thus, tunnel water inflow can be predicted dynamically by setting the exchange coefficients and reference water heads with consideration to the tunnel excavation progress and construction techniques (such as grouting, lining, etc.). The method is applied to the calculation of water inflow in inclined tunnels and shafts in an underground project, with good practical effect.

**Keywords:** tunnel water inflow; inclined fault; 3D geological model; fully unstructured grids; water inflow dynamic prediction

隧洞涌水量的精准预测是水文地质学科中一个重要的理论问题,同时也是隧洞防排水设计和施工中一个亟待解决的问题。隧洞涌水量的预测方法主要包括理论解析法、经验公式法和数值模拟法<sup>[1]</sup>,其中理论解析法和经验公式法适合水文地质条件相对简单的隧洞涌水量计算,而数值模拟方法适合水文地质条件较为复杂的隧洞涌水量计算。随着隧洞埋深大、长度长的发展新趋势,隧洞所处水文地质条件越来越复杂,数值模拟方法被广泛地应用于各类隧洞工程涌水量计算中。

在隧洞涌水模拟预测过程中,通常假定隧洞开挖瞬间完成,而未考虑施工进度,且较难精细刻画倾斜断层、倾斜隧洞等复杂地质体<sup>[2-3]</sup>。M. Golian<sup>[4]</sup>和李豫馨<sup>[5]</sup>等分别利用 Modflow 的 Drain 边界和对 Modflow 进行二次开发实现了隧洞逐步开挖的效果,刘建等<sup>[6]</sup>利用 BP 神经网络模型对四川垫邻高速铜锣山隧道进行了动态预测,J. Molinero 等<sup>[7]</sup>利用 TRANMEF-3 程序对隧道掘进过程中周围不断变化的水文地质条件进行了准确模拟。然而上述这些方法存在刻画的隧洞仍是水平的或通用性有限等问题。随着三维地质建模技术的发展和成熟<sup>[8-11]</sup>,三维地质建模软件已展示出较强的构建复杂地质模型的能力<sup>[12-15]</sup>。针对隧洞涌水量预测中复杂地质体精细刻画和涌水量动态预测等问题,笔者提出一套三维地质模型与 Feflow 耦合方法,通过该方法实现地下水数值模型中对倾斜断层、倾斜隧洞和侵入体等不规则地质体的精细刻画,并基于数值模型中的精细刻画成果,考虑施工进度和施工工艺(如注浆、衬砌等),以期实现倾斜隧洞、竖井等开挖过程中涌水量的动态预测。

### 1 三维地质模型与 Feflow 耦合方法

#### 1.1 Feflow 网格剖分要求

结构化网格是指网格单元为六面体,网格内部点都具有相同的毗邻单元,在网格区域内为均匀网格,节点位于每一层的网格线上,且每层的节点数相等。这样的网格,某一节点与其相邻节点的位置关系可由网格编号的规律而得出,因此,数据结构相对简单,且具有网格生成速度快与质量好的特点,但对于不规则边界刻画的效果较差。相比结构化网格,完全非结构化

网格没有规则的拓扑结构,网格内部节点分布具有任意性,各节点不具有相同的毗邻单元,网格单元可以是多种形状,如四面体、五面体或棱形等,对于不规则的边界刻画效果较好,但对计算机性能要求相对较高。

Feflow 从 7.0 版本开始内置了 Tetgen 模块,从而支持完全非结构化网格模型。Tetgen 软件是由德国计算数学与科学计算应用分析和随机指数维尔斯特拉斯研究所(WIAS)Hang Si 编写的优质四面体网格生成器和三维 Delaunay 三角形剖分器,为了生成四面体网格,输入的几何模型必须满足一些非常严格的要求:在描述网格域的曲面中不允许存在间隙或重叠(图 1),并且任何网格都不能相交,即要求输入的几何模型具有密封性和不自相交性(图 2)。在大多数情况下,导入 Feflow 的几何模型是地质模型或三维绘图软件中生成的模型。

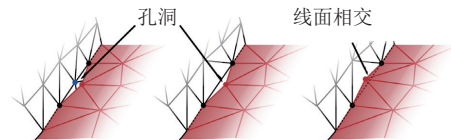
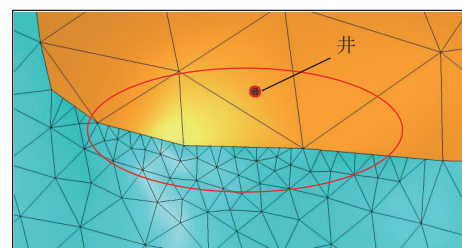
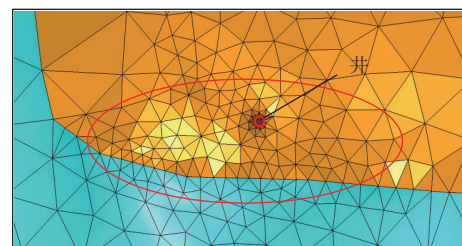


图 1 经常发生的三角剖分错误示例(基于 B. Zehner<sup>[14]</sup> 修改)  
Fig.1 Schematic diagram of frequent 3D Delaunay triangulation errors (Modified based on B. Zehner<sup>[14]</sup>)



(a) 非密封, 自相交



(b) 密封, 非自相交

图 2 边界密封性对比

Fig.2 Schematic diagram of sealing and self-intersection of boundary



Feflow 支持 SKUA-GOCAD 三维地质建模软件的文件格式, 可将生成的三维地质模型导入 Feflow 中, 因此笔者选择 SKUA-GOCAD 与 Feflow 进行耦合。

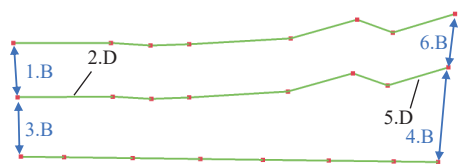
## 1.2 复杂地质体刻画方法

Feflow 要求刻画的几何模型具有密封性和不自相交性, 因此使用 GOCAD(v15.5) 刻画模型时需要进行一些特殊的操作, 步骤如下。

### 1.2.1 GOCAD 中密封性轮廓线的构造

首先在 GOCAD 中根据已有的地质资料刻画出每个地质体和断层的边界, 此为正常操作, 不再赘述。需要注意的是隧洞的精细刻画, 主要有两点: 第一是为了能够在随后的数值模拟中考虑施工进度和施工工艺, 实现对隧洞涌水量的动态预测, 需要对隧洞进行分段刻画, 如设置 10 m 一段或者根据开挖进度设置每段长度; 第二是隧洞形状可为任意形状, 如城门形、圆形等, 可在 CAD 中绘制其边界, 然后导入 GOCAD。

其次根据初步生成的各个边界, 利用 GOCAD 求出各相交面的交线, 将这些交线添加至各面的轮廓线内。由于 GOCAD 自身软件功能限制, 实现边界接触处共享顶点和线段需要用到 GOCAD 的插件 CompGeom, 利用 move atoms to nearest atoms of objects(移动节点到最近的目标节点)对接触面的点进行移动。需要注意的是在 GOCAD 中一个节点只能连接 1 个或 2 个线段(Segment), 因此由节点生成线段时需要注意创建顺序, 防止删除共用的节点(图 3)。另外, 为了使剪裁过程中不产生额外节点, 要沿着指定节点进行剪裁, 为实现这一目的需使用插件 CompGeom 中 Projectd-Rem.Trpls outside cruve/ Rem.Trpls inside cruve(投影-剪裁曲线外/曲线内网格)命令。根据以上操作在 GOCAD 中依次构建满足密封性条件的所有表面轮廓线。



注: 图中数字表示操作顺序; 字母 B 表示创建线段; D 表示删除线段。

图 3 共用节点创建线段操作步骤

Fig.3 Steps for creating line segments with shared nodes

### 1.2.2 基于新轮廓线的边界面生成

由于 GOCAD 生成面功能有限, 不能沿某条线或穿过指定点进行网格剖分, 这导致 GOCAD 里不能在各个面的交线上生成节点, 进而生成密封网格, 因此使用 ComGeom 插件并调用 Gmsh 软件实现该功能。

Gmsh 是一个免费的带有内置前后期处理功能的三维有限元网格生成器。其设计的目标是要提供一个快速轻便的具有可控参数功能和先进的可视化能力的网格生成工具。利用 Gmsh(v2.4.2) 中 Mesh-3D 命令将边界轮廓线生成面并进行网格剖分, 然后依次重新导入 GOCAD 并恢复高程信息。

断层在 Feflow 中作为离散特征元素(Discrete Feature Elements, DFEs)进行处理, 主要通过降维的手段实现与原模型的耦合, 即在二维模型中添加 1 维 DFEs, 在三维模型中添加二维 DFEs, 每个 DFEs 可以单独设置几何参数、流动参数等, 因此在三维地质模型中断层以平面的形式进行创建。

### 1.2.3 边界面的密封性与不自相交性检验

首先利用 CompGeom 插件生成 smesh 文件, 该文件为包含曲面所有三角形和点的三角剖分文件, 且每个点都具有一个全局编号。其次在计算机里利用 Tetgen 软件打开并检查生成的 smesh 文件的密封性和自相交性, 根据输出结果定位出现自相交问题的点的坐标。然后利用插件 CompGeom 中 Start to debug with tetgen-d output(开始利用 Tetgen 调试)命令, 导入上一步检查生成的 Node(节点)文件, 输入存在问题的点的坐标并按要求修改相应的表面轮廓边界线。修改完所有点后利用 Tetgen 重新检查, 直至检查结果不再提示各边界存在自相交, 最后在 GOCAD 中利用构造建模命令重新生成完整模型。

### 1.2.4 Feflow 中三维地质模型的导入

目前 Feflow 支持导入的 GOCAD 模型数据格式为 ts(面文件)和 ml(Model3D 格式), 这些文件将作为 supermesh 文件导入 Feflow, 其中 ml 文件保留了三维地质模型生成后各个体单元的信息, 导入 Feflow 后可根据不同的体单元进行选择, 因此选择 ml 文件格式作为 GOCAD 模型的输出格式。需要注意的是在 Feflow 中使用 Tetgen 剖分器进行网格剖分时要选择 Preserve external boundary(保留外部边界)和保留网格实体 Preserve mesh entities(保留网格实体), 确保剖分后对不同的区域能够正确识别。

## 1.3 隧洞涌水动态预测

隧洞实际开挖时为逐段开挖, 且开挖过一段时间后会已开挖的洞段进行衬砌和灌浆, 从而降低已开挖洞段的渗透性, 为了与隧洞开挖时的真实情况接近, 更准确预测隧洞开挖时的涌水量, 模型预测隧洞涌水量时应考虑施工进度和施工工艺。

在三维地质模型导入 Feflow 并重新剖分后, 在三维地质模型中独立创建的每一段隧洞此时已可以在 Feflow 中按单元(Element)进行单独选择, 在此基础上

本文采用了一种施工条件下隧洞涌水量预测的实用技术,将隧洞指定为第三类变流量边界。该边界通常用于河流、湖泊和排水沟,在 Feflow 中三类边界的控制方程如下:

$$Q = A\Phi(h_{\text{ref}} - h) \quad (1)$$

式中:  $Q$  为流入/流出模型的流量;  $A$  为相关区域面积;  $\Phi$  为交换系数;  $h_{\text{ref}}$  为参考水头;  $h$  为当前地下水水头。

$\Phi$  的值由以下方程控制:

$$\Phi = K/d \quad (2)$$

式中:  $K$  为堵塞层的渗透系数;  $d$  为堵塞层的厚度。

在 Feflow 中第三类边界只有同时设置  $\Phi$  和  $h_{\text{ref}}$  且  $\Phi$  不为 0 才起作用,利用这一特性在模型中模拟隧洞逐步开挖过程。首先在 Feflow 中将每一段隧洞的参考水头均指定为相应的洞段高程,其次将交换系数  $\Phi$  (Out-transfer rate) 指定为随时间变化的值,在隧洞开挖前将交换系数设定为 0,在隧洞开挖后设置为一个较大的值<sup>[16]</sup>,在进行衬砌灌浆以后可设置为一个相对较小的值。 $\Phi$  主要由隧洞围岩特性、裂隙或溶洞发育情况、地下水流速、防渗措施等因素决定。

## 2 实例研究

### 2.1 工程背景

以某地下工程斜井和竖井开挖为例开展相关研究。该工程区地下水类型主要为基岩裂隙水,年平均降雨量为 2 076 mm。地形主要为低山丘陵区,山坡地形坡度 10°~20°,地形最低处为西侧某冲沟,走向为近东西向。工程区东侧约 300 m 为走向近南北的地表分水岭,分水岭两侧均有泉水出露。区内地下水接受大气降水补给后,沿基岩裂隙向沟谷排泄,最终汇入地表河流。

该地下工程位于燕山期花岗岩岩株体内,岩株体周围是寒武系、奥陶系的粉砂岩、长石石英砂岩,局部夹泥质页岩。斜井入口位于工程区西北部,其前半部分位于粉砂岩内,后半部分位于花岗岩体内,总长度约 1 360 m。竖井孔口位于工程区中部,竖井整体位于花岗岩体内,长度约 550 m。斜井斜穿断层 XF1,断层产状: 260°/NW ∠ 60°~80°,断层影响带宽度 0.3~0.6 m,断层带渗透系数为 30 m/d。

### 2.2 模型构建

根据地质资料建立三维地质模型,工程区斜井、竖井和地层分布情况如图 4a 所示,以断层面为截面的剖面如图 4b 所示。模型长度为 2 820 m,宽度为 2 440 m,厚度为 930 m,其中风化层厚度为 30 m。斜井设置每 10 m 为一洞段进行建模,竖井设置每 11 m 为一洞段

进行建模。

将三维地质模型导入 Feflow 后,经过完全非网格化剖分(图 5)产生的单元(Element)共有 1 761 620 个,节点(Node)304 876 个,各地质单元剖分后统计信息见表 1。

### 2.3 模型设置

本模型为非稳定流模型,模拟期为斜井和竖井的整个开挖期,共计 1 100 d。斜井和竖井开挖以月为单位(按 30 d 计)分段开挖,斜井每月开挖 40 m,共计 34 个月。竖井每月开挖 22 m,共计 25 个月。斜井在模型运行的第 1 天开始开挖,竖井在模型运行的第 15 天开始开挖,在开挖后第 10 天进行固结灌浆(表 2)。

根据野外调查结果,模型北侧和南侧边界均为第三类边界,参考水头分别为 60 和 90 m,东侧和西侧边界均为隔水边界。

降水按照源/汇项进行处理,在 Feflow 中通过对地表风化层利用 In/outflow on top/bottom 命令模拟,降雨量数值通过时间序列文件按多年月平均降雨量输入,降雨入渗系数取 0.1。

隧洞边界设置为第三类边界,参考高程设置为隧洞的高程,对每个开挖洞段的交换系数均设置为随时间变化的序列值,通过交换系数的不同模拟隧洞开挖前、裸洞以及固结灌浆等。

模型中水文地质参数主要包括渗透性、给水度以及断层特征,这些参数的分布是根据岩石类型、岩石的空间分布和岩石分布的垂直变化来确定的。断层在 Feflow 中作为二维离散特征元素(DFEs)进行处理,主要参数包括断层宽度和渗透系数等,根据野外调查与压水试验反演结果,此次模型中断层宽度和渗透系数分别设置为 0.6 m 和 30 m/d。

初始地下水流场对于模型十分重要,由于缺乏足够的地下水位监测数据,本次利用稳定流模型模拟确定天然条件下的地下水流场分布,并将该结果作为非稳定流模型的初始流场。

### 2.4 模型校正

该地下工程在斜井与竖井的开挖阶段未进行地下水位监测,只有每月的排水量数据,且在开挖完成后未单独进行涌水量监测,因此本次将模型前 500 d 排水量用于率定参数,完成隧洞涌水量与排水量的数据拟合(图 6),后 600 d 作为模型预测期。

经模型校正后,最终确定模型北侧和南侧边界交换系数分别为 0.07 和 0.09。隧洞开挖前交换系数为 0,裸洞时交换系数为 90,固结灌浆后交换系数为 0.04(表 2)。各地质单元的渗透系数见表 3。

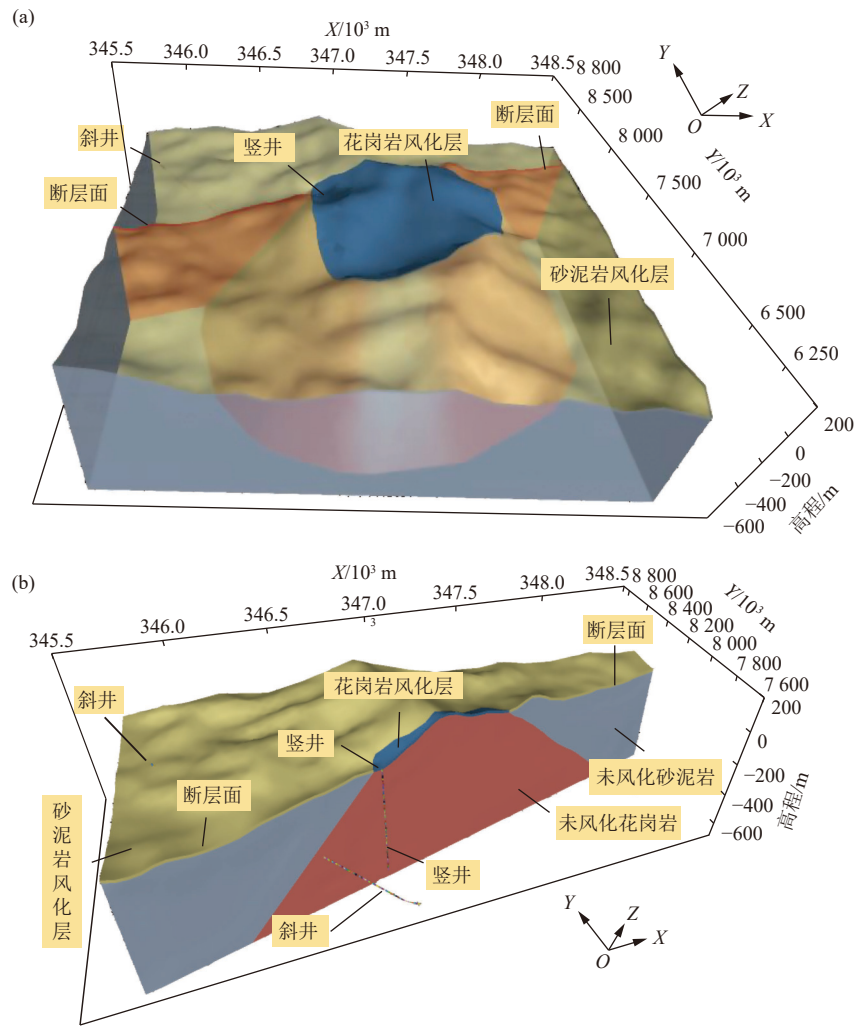


图 4 三维地质模型透视图  
Fig.4 Perspective of 3D geological model

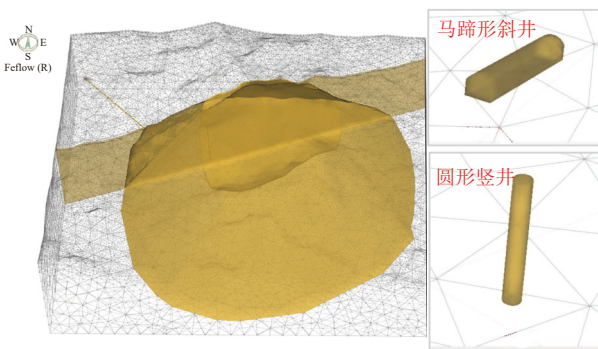


图 5 Feflow 中部分地质体剖分效果  
Fig.5 Rendering of partial geological bodies in Feflow

### 2.5 结果分析

模型校正后可得出不同运行天数的地下水流场图(图 7)。可以看出在斜井和竖井开挖后,仅在开挖段附近出现明显的地下水低水位,而其他未开挖段周围流场未发生明显变化,随后由于固结灌浆降低了开挖隧洞段透水性,已进行固结灌浆的洞段低水位已不再明显,说明本模型实现了对倾斜隧洞和竖井的分段开

表 1 Feflow 中各地质单元统计信息  
Table 1 Statistical information of geological units in Feflow

地质单元	单元(Element)数	节点(Node)数*
断层		1 240
斜井	268 395	69 472
竖井	264 990	69 580
砂泥岩风化层	171 659	54 296
花岗岩风化层	33 636	10 256
未风化砂泥岩	451 562	105 048
未风化花岗岩	571 478	147 875

注: \*表示由于存在共用节点,各地质单元节点数之和大于总节点数。

挖和进行固结灌浆的模拟。

需要注意的是,模型中当斜井开挖至断层带附近后,断层中的地下水将流入隧洞,在断层面上产生一个低水位等势面,此时隧洞瞬时涌水量最大为 433.42 m<sup>3</sup>/h(实际涌水量 400 m<sup>3</sup>/h)。充分利用该信息,可在其他类似工程中降低施工风险,减小灾害损失。

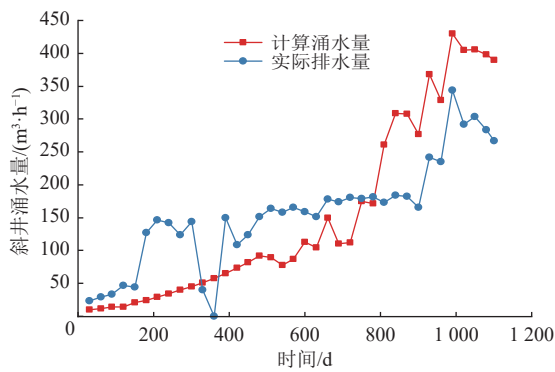
表 2 隧洞开挖过程参数信息  
Table 2 Parameters duration tunnel evacuation

名称	开挖过程			裸洞			固结灌浆		
	开始时间/d	终止时间/d	交换系数	开始时间/d	终止时间/d	交换系数	开始时间/d	终止时间/d	交换系数
斜井1段	0	30	0	30	40	90	40	1 100	0.04
竖井1段	15	45	0	45	55	90	55	1 100	0.04
斜井2段	30	60	0	60	70	90	70	1 100	0.04
竖井2段	45	75	0	75	85	90	85	1 100	0.04
斜井3段	60	90	0	90	100	90	100	1 100	0.04
竖井3段	75	105	1	105	115	90	115	1 100	0.04
斜井4段	90	120	0	120	130	90	130	1 100	0.04
竖井4段	105	135	2	135	145	90	145	1 100	0.04
斜井5段	120	150	0	150	160	90	160	1 100	0.04
竖井5段	135	165	3	165	175	90	175	1 100	0.04
斜井6段	150	180	0	180	190	90	190	1 100	0.04
竖井6段	165	195	4	195	205	90	205	1 100	0.04
斜井7段	180	210	0	210	220	90	220	1 100	0.04
竖井7段	195	225	5	225	235	90	235	1 100	0.04
斜井8段	210	240	0	240	250	90	250	1 100	0.04
竖井8段	225	255	6	255	265	90	265	1 100	0.04
斜井9段	240	270	0	270	280	90	280	1 100	0.04
竖井9段	255	285	7	285	295	90	295	1 100	0.04
斜井10段	270	300	0	300	310	90	310	1 100	0.04
竖井10段	285	315	8	315	325	90	325	1 100	0.04
斜井11段	300	330	0	330	340	90	340	1 100	0.04
竖井11段	315	345	9	345	355	90	355	1 100	0.04
斜井12段	330	360	0	360	370	90	370	1 100	0.04
竖井12段	345	375	10	375	385	90	385	1 100	0.04
斜井13段	360	390	0	390	400	90	400	1 100	0.04
竖井13段	375	405	11	405	415	90	415	1 100	0.04
斜井14段	390	420	0	420	430	90	430	1 100	0.04
竖井14段	405	435	12	435	445	90	445	1 100	0.04
斜井15段	420	450	0	450	460	90	460	1 100	0.04
竖井15段	435	465	13	465	475	90	475	1 100	0.04
斜井16段	450	480	0	480	490	90	490	1 100	0.04
竖井16段	465	495	14	495	505	90	505	1 100	0.04
斜井17段	480	510	0	510	520	90	520	1 100	0.04
竖井17段	495	525	15	525	535	90	535	1 100	0.04
斜井18段	510	540	0	540	550	90	550	1 100	0.04
竖井18段	525	555	16	555	565	90	565	1 100	0.04
斜井19段	540	570	0	570	580	90	580	1 100	0.04
竖井19段	555	585	17	585	595	90	595	1 100	0.04
斜井20段	570	600	0	600	610	90	610	1 100	0.04
竖井20段	585	615	18	615	625	90	625	1 100	0.04

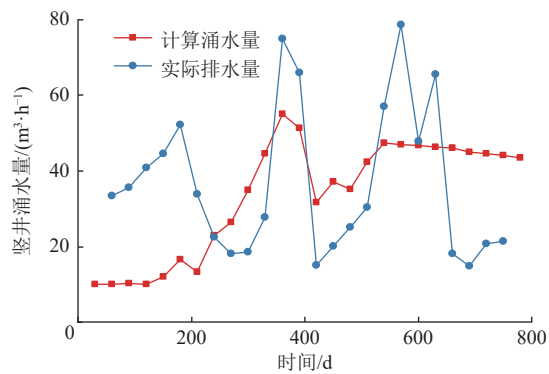


续表 2

名称	开挖过程			裸洞			固结灌浆		
	开始时间/d	终止时间/d	交换系数	开始时间/d	终止时间/d	交换系数	开始时间/d	终止时间/d	交换系数
斜井21段	600	630	0	630	640	90	640	1 100	0.04
竖井21段	615	645	19	645	655	90	655	1 100	0.04
斜井22段	630	660	0	660	670	90	670	1 100	0.04
竖井22段	645	675	20	675	685	90	685	1 100	0.04
斜井23段	660	690	0	690	700	90	700	1 100	0.04
竖井23段	675	705	21	705	715	90	715	1 100	0.04
斜井24段	690	720	0	720	730	90	730	1 100	0.04
竖井24段	705	735	22	735	745	90	745	1 100	0.04
斜井25段	720	750	0	750	760	90	760	1 100	0.04
竖井25段	735	765	23	765	775	90	775	1 100	0.04
斜井26段	750	780	0	780	790	90	790	1 100	0.04
斜井27段	780	810	0	810	820	90	820	1 100	0.04
斜井28段	810	840	0	840	850	90	850	1 100	0.04
斜井29段	840	870	0	870	880	90	880	1 100	0.04
斜井30段	870	900	0	900	910	90	910	1 100	0.04
斜井31段	900	930	0	930	940	90	940	1 100	0.04
斜井32段	930	960	0	960	970	90	970	1 100	0.04
斜井33段	960	990	0	990	1 000	90	1 000	1 100	0.04
斜井34段	990	1 020	0	1 020	1 030	90	1 030	1 100	0.04



(a) 斜井



(b) 竖井

图 6 隧洞排水量动态变化曲线对比

Fig.6 Comparison diagram of dynamic change curves of tunnel drainage

表 3 各地层单元渗透系数  
Table 3 Hydraulic conductivity of geological units

地质单元	单位: m/d		
	$K_x$	$K_y$	$K_z$
砂泥岩风化层	0.40	0.40	0.40
花岗岩风化层	1.00	1.00	1.00
未风化砂泥岩	0.08	0.05	0.05
未风化花岗岩	0.30	0.08	0.08

注:  $K_x$ 、 $K_y$ 、 $K_z$ 分别为x、y、z三个方向的渗透系数。

### 3 结论

a. 通过解决三维地质模型与三维地下水数值模型耦合过程中要求的非自相交性和密封性问题, 提出一套基于复杂地质体精细刻画的隧洞涌水量动态预测方法。该方法实现了对复杂地质体的精细剖分, 以及考虑隧洞开挖进度和施工工艺的隧洞涌水量动态预测。

b. 将提出的方法应用于某地下工程斜井和竖井开挖过程的模拟, 在充分利用已有地质模型数据的基础上, 继续进行隧洞涌水量的预测, 扩展了三维地质模型的使用范围, 同时也提高了隧洞涌水量预测的精确性, 使模拟结果更加符合实际情况。

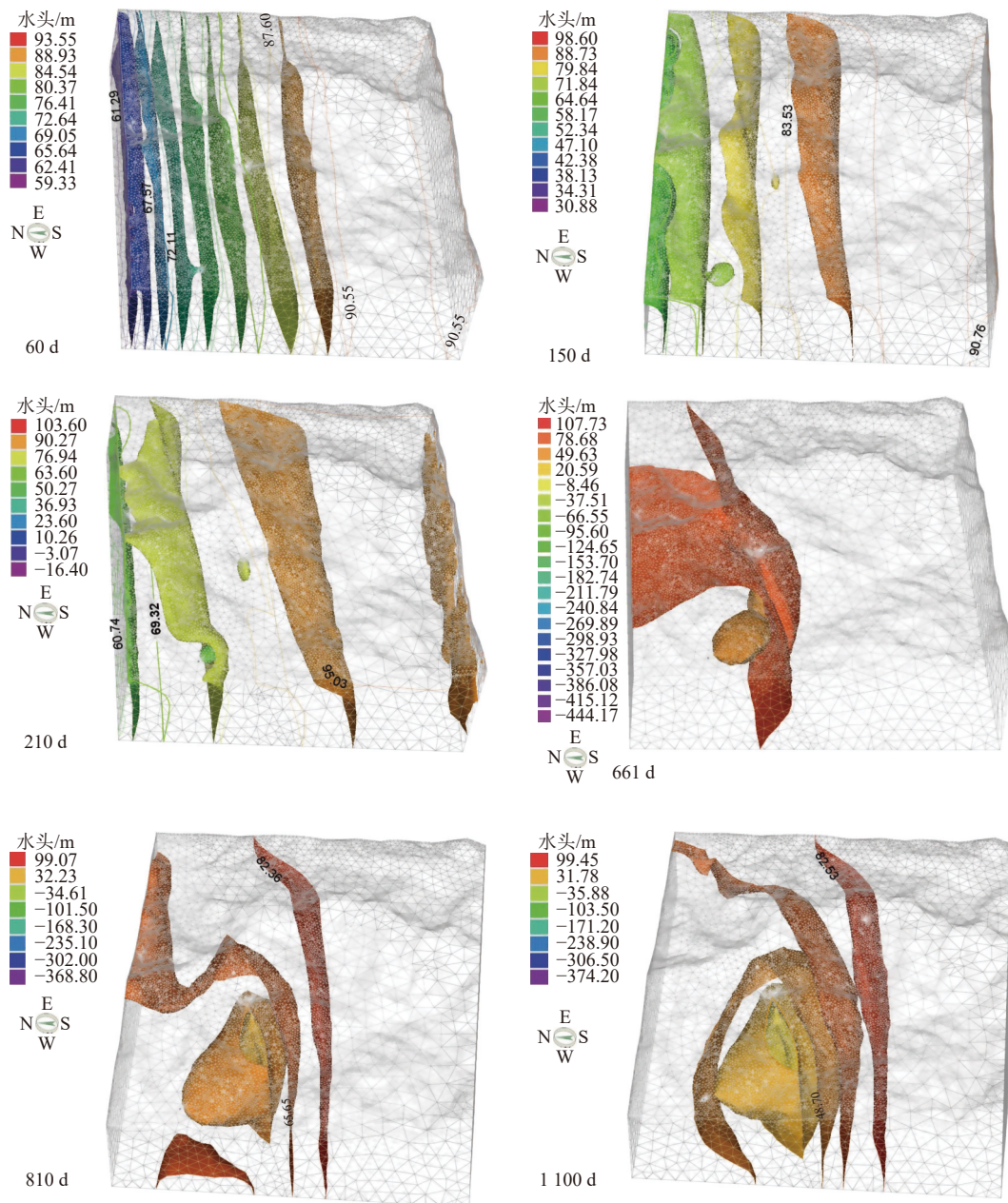


图 7 隧洞开挖不同天数的地下水流场等值面

Fig.7 Groundwater contour map for different days of tunnel excavation

参考文献(References)

[1] 吴建,周志芳,李鸣威,等.隧洞涌水量预测计算方法研究进展[J].工程地质学报,2019,27(4):890-902.  
WU Jian, ZHOU Zhifang, LI Mingwei, et al. Advance on the methods for predicting water inflow into tunnels[J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(4): 890-902.

[2] 江思珉,王耀明,栗现文,等.深长隧道涌水量预测的三维数值模拟研究[J].现代隧道技术,2018,55(2):78-83.  
JIANG Simin, WANG Yaoming, LI Xianwen, et al. 3D numerical simulation for predicting water inflow volume in deep and long tunnels[J]. Modern Tunnelling Technology, 2018, 55(2): 78-83.

[3] 朱彬彬,董道军,吴立,等.穿越富水断层深埋引水隧洞涌水量预测研究[J].铁道科学与工程学报,2017,14(11):2407-2417.  
ZHU Binbin, DONG Daojun, WU Li, et al. On the prediction of water inflow in deep buried diversion tunnel through water-rich fault[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14(11): 2407-2417.

[4] GOLIAN M, TESHNIZI E S, NAKHAEI M. Prediction of water inflow to mechanized tunnels during tunnel-boring-machine advance using numerical simulation[J]. Hydrogeology Journal, 2018, 26(8): 2827-2851.

[5] 李豫馨,夏强,许模,等.隧洞开挖过程涌水量的动态模拟[J].现代隧道技术,2015,52(5):125-130.  
LI Yuxin, XIA Qiang, XU Mo, et al. Dynamic simulation of water inflows during tunnel excavation[J]. Modern Tunnelling Technology, 2015, 52(5): 125-130.

- [6] 刘建, 刘丹. 利用BP神经网络模型动态预测隧道涌水量: 以铜锣山隧道为例[J]. 现代隧道技术, 2012, 49(3): 62-66.  
LIU Jian, LIU Dan. Dynamic predication of tunnel water inflow based on BP neural network: A case study of the Tongluoshan tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2012, 49(3): 62-66.
- [7] MOLINERO J, SAMPER J, JUANES R. Numerical modeling of the transient hydrogeological response produced by tunnel construction in fractured bedrocks[J]. *Engineering Geology*, 2002, 64(4): 369-386.
- [8] 李青元, 张洛宜, 曹代勇, 等. 三维地质建模的用途、现状、问题、趋势与建议[J]. 地质与勘探, 2016, 52(4): 759-767.  
LI Qingyuan, ZHANG Luoyi, CAO Daiyong, et al. Usage, status, problems, trends and suggestions of 3D geological modeling[J]. *Geology and Exploration*, 2016, 52(4): 759-767.
- [9] HOULDING S W. 3D geoscience modeling: Computer techniques for geological characterization[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1994.
- [10] MALLETT J L. Discrete smooth interpolation[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 1989, 8(2): 121-144.
- [11] MALLETT J L. Discrete smooth interpolation in geometric modeling[J]. *Computer-Aided Design*, 1992, 24(4): 178-191.
- [12] ZEHNER B, BORNER J H, GORZ I, et al. Workflows for generating tetrahedral meshes for finite element simulations on complex geological structures[J]. *Computers & Geosciences*, 2015, 79: 105-117.
- [13] PELLERIN J, LEVY B, CAUMON G, et al. Automatic surface remeshing of 3D structural models at specified resolution: A method based on Voronoi diagrams[J]. *Computers & Geosciences*, 2014, 62: 103-116.
- [14] ZEHNER B. Constructing a volumetric model from a complex 3D structural pilot area in the German North Sea Sector[C]//Proceedings of the RING Meeting. France, Nancy, 2018: 1-8.
- [15] ZEHNER B. Constructing geometric models of the subsurface for finite element simulation[C]//IAMG 2011. Salzburg, 2011: 30347705.
- [16] ZHANG J, JARAMILLO C, FELDSHER T. Transient simulation of groundwater flow for tunnel construction using time-variable boundary condition[C]//AGU Fall Meeting Abstracts. San Francisco Marriott, 2007: 1-5.

(责任编辑 周建军)