

# 隧道涌水难题新突破：新型模型揭示裂隙与基质渗透率的“耦合秘密”

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/39930.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

隧道涌水难题新突破：新型模型揭示裂隙与基质渗透率的“耦合秘密”。研究背景

2026年5月12日，是第18个全国防灾减灾日，主题是人人讲安全、个个会应急——提高防灾减灾救灾能力。据统计，2010至2020年间，我国隧道涌水相关灾害位列隧道施工事故致死原因前列。精准预测涌水量是保障隧道施工安全、优化防水排水设计的前提。然而，实际岩体中既存在作为主要导水通道的裂缝网络，也存在渗透性不可忽略的岩石基质，二者共同作用，使得涌水机制极为复杂。

近日，同济大学土木工程学院李晓军、芮易团队在期刊ENGINEERING Structure and Civil Engineering上发表了题为Coupled effects of fracture spatial distribution and rock matrix permeability on tunnel water inflow: An embedded discrete fracture model based investigation的研究论文。该研究聚焦于隧道工程中备受关注的地下水涌水问题。

研究挑战

以往研究往往简化问题：要么假设岩石基质完全不透水，仅考虑裂隙导水；要么将裂隙和基质等效为均匀介质，掩盖了裂隙网络的几何细节。

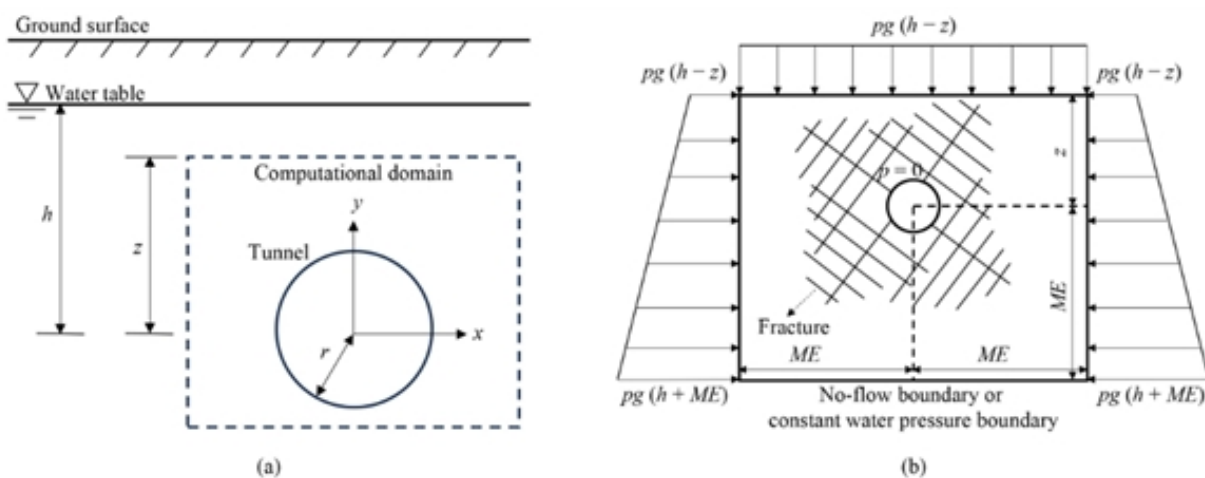


图1.隧道模型示意图：(a) 空间配置；(b) 计算域的几何形状与边界条件。

这种简化在裂隙渗透率远大于基质渗透率时是成立的，但在基质渗透性较强（如多孔碳酸盐岩）或裂隙因充填而导水性下降时，忽略基质渗透率将导致显著的预测偏差。更重要的是，裂隙的空间分布（开度、间距、倾角）与基质渗透率之间存在复杂的非线性耦合效应，缺乏系统性的量化研究。传统的数值模拟方法（如一致网格法）在处理复杂裂隙网络时面临网格生成困难、计算成本高昂的瓶颈，难以高效探究这一科学问题。

## 研究突破

针对上述挑战，研究团队引入并发展了一种基于嵌入式离散裂隙模型（EDFM）的新型隧道涌水计算模型。该模型的核心优势在于能够将裂隙作为低维实体嵌入到规则的基质背景网格中，通过代数方程处理二者间的水力交换，从而规避了传统方法中繁琐的网格剖分过程，大幅提升了计算效率和稳定性。

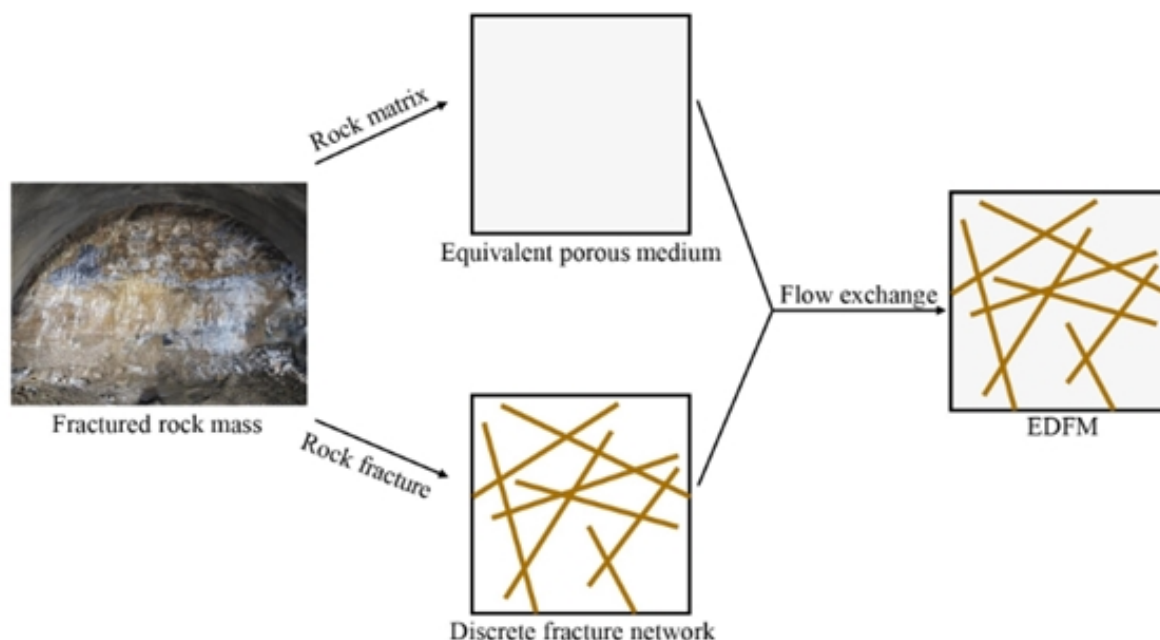


图2.裂隙岩体的EDFM表征

基于该模型，团队开展了大规模数值试验，建立了涌水量与裂隙参数的二次回归模型，并利用方差分析量化了各因素的耦合效应。研究取得了关键发现：

确立了主导因素：在所有条件下，裂隙开度、裂隙间距及其二者的交互作用是控制隧道涌水量的三大核心因素，而裂隙倾角的影响几乎可以忽略。

揭示了阈值行为：发现存在一个临界裂隙-基质渗透率比阈值（ $(k_f/k_m)_{crit}=10^?$ ）。当渗透率比低于此阈值时，基质渗透率与裂隙参数的耦合效应显著；高于此阈值时，基质影响可忽略不计，系统转为裂隙主导。

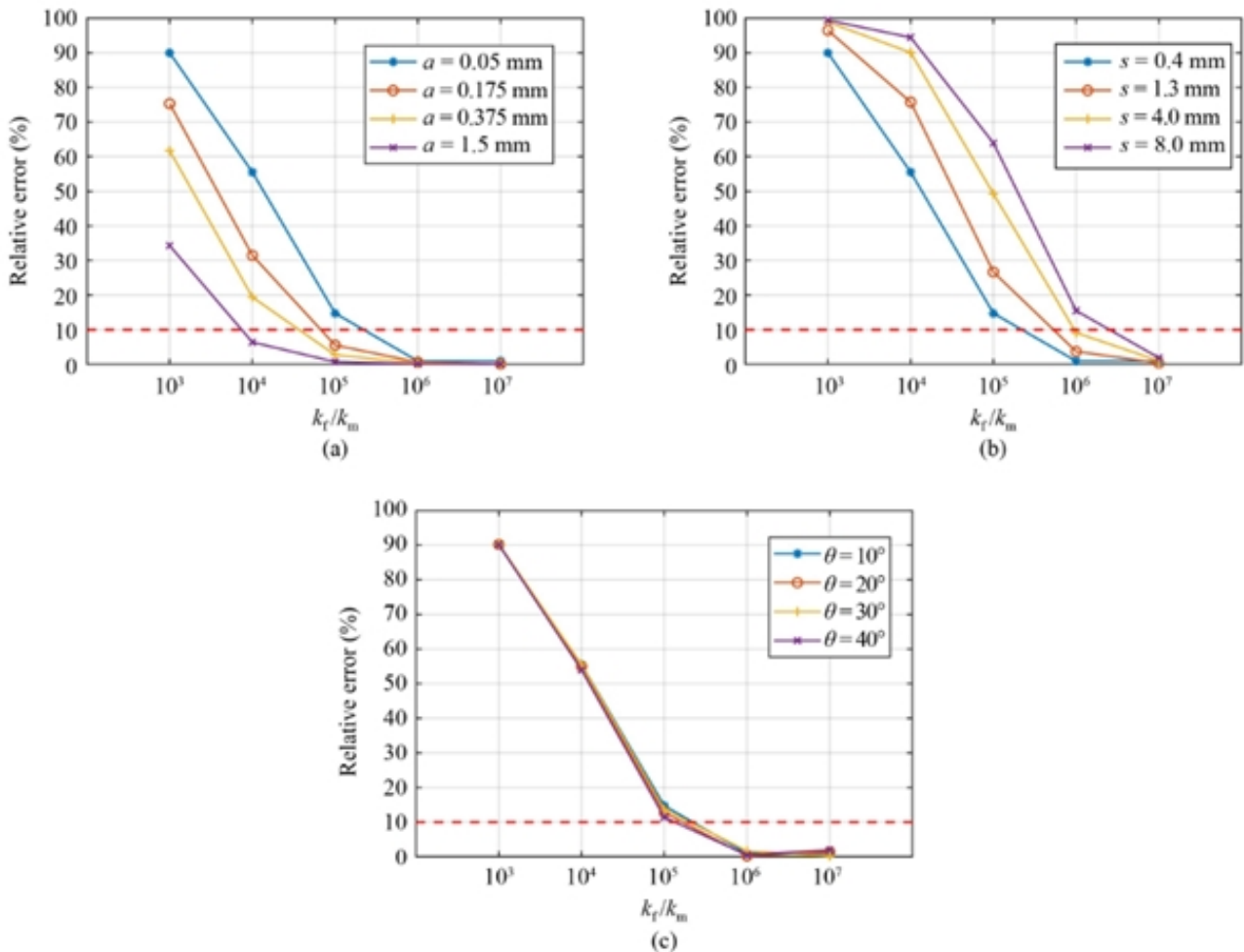


图3.忽略基质渗透性引起的隧道涌水相对误差

量化了工程判据：研究明确指出，当渗透率比值大于 $10^7$ 时，忽略基质渗透率带来的计算误差小于10%，这为工程师判断何时可采用简化模型提供了定量依据。

### 研究意义

本研究不仅提出了一种高效、精准的涌水量预测新工具，还对我国交通强国战略下的深部地下空间开发与重大隧道工程建设具有重要的现实指导意义。

直击工程勘察痛点。研究发现，在基质渗透性较好的地层中，盲目加密裂隙勘探可能事倍功半；此时，通过现场压水试验获取准确的基质渗透率参数更为关键。这有助于优化勘察资源配置，降本增效。

有望实现精准防灾减灾。研究揭示的大开度与高渗透率比（ $k_f/k_m$ ）耦合导致局部高速涌水的机理，为川藏铁路、深埋隧道等高风险工程的超前地质预报和预注浆加固提供了科学靶区，有助于从源头遏制突涌水灾害。

支撑地下水环境保护。准确的涌水量预测是评估隧道排水对地表植被、地下水资源影响的前提。在我国大力推进生态文明建设的背景下，该研究有助于平衡隧道工程安全与地下水环境保护的关

---

系，推动隧道工程向绿色、韧性方向发展。（来源：EngineeringJournals微信公众号）

相关论文信息：<https://journal.hep.com.cn/fsce/EN/10.1007/s11709-026-1278-8>

特别声明：本文转载仅仅是出于传播信息的需要，并不意味着代表本网站观点或证实其内容的真实性；如其他媒体、网站或个人从本网站转载使用，须保留本网站注明的“来源”，并自负版权等法律责任；作者如果不希望被转载或者联系转载稿费事宜，请与我们联系。

作者：李晓军等 来源：《工程·结构与土木工程》

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发