



東南大學
SOUTHEAST UNIVERSITY

研究生讲座报告

深部软弱地层 TBM 掘进挤压大变形卡机风险与安全控制分析

课程名称: 专业讲座

姓名: 桑阳

学院: 苏州联合研究生院

专业: 岩土工程

学号: 224642

课程老师: 赵学亮

2022 年 9 月 24 日

東南大學講座報告

SOUTHEAST UNIVERSITY

专业： 岩土工程
姓名： 桑阳
学号： 224642

讲座名称： 深部软弱地层 TBM 掘进挤压大变形卡机风险与安全控制分析

演讲人： 吴志军 讲座日期： 2022 年 9 月 24 日 讲座地点： 线上

一、 研究目的和背景

随着“西部大开发”和“一带一路”战略深入实施，一批跨流域调水、高速交通工程正在西部兴起，需建设大量深长隧道。TBM 工法成为深长隧道施工的发展方向，施工高效：掘进速度是钻爆法的 3 10 倍；围岩稳定：断面形状有利，开挖扰动小，及时封闭支护；利于环保：支洞少，开挖量小，对地下水和地表环境影响小。未来 10 年，预计我国将有超过 5000 公里隧道采用 TBM 施工，已成为 TBM 隧道掘进的第一大国。

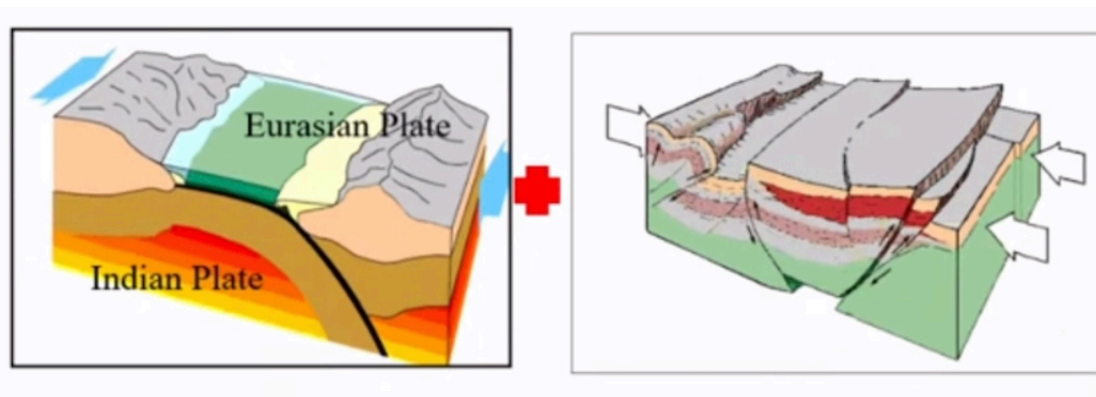


图 1: 西部地层剪切挤压

西部地区深部地层经历了多次构造运动的剪切挤压，破碎软弱，赋存高地应力。本讲座主要研究的内容是深部软弱地层挤压大变形卡机致灾机理、深部软弱地层挤压大变形卡机灾害分析预测方法和深部软弱地层挤压大变形卡机灾害控制技术。

二、 研究内容和步骤

1. 理论分析方法

(1) 岩石卸荷损伤扩容-破裂碎胀机理

反映 TBM 开挖卸荷特征的砂质泥岩三轴卸围压试验和卸荷蠕变试验：揭示了卸荷和蠕变过程中的岩石损伤、变形、破坏规律，深部软弱地层 TBM 开挖挤压大变形主要由两部分组成：峰前损伤扩容 + 峰后破裂碎胀。揭示了：微裂隙、孔隙度、矿物大小、矿物形状、矿物力学性质以及微

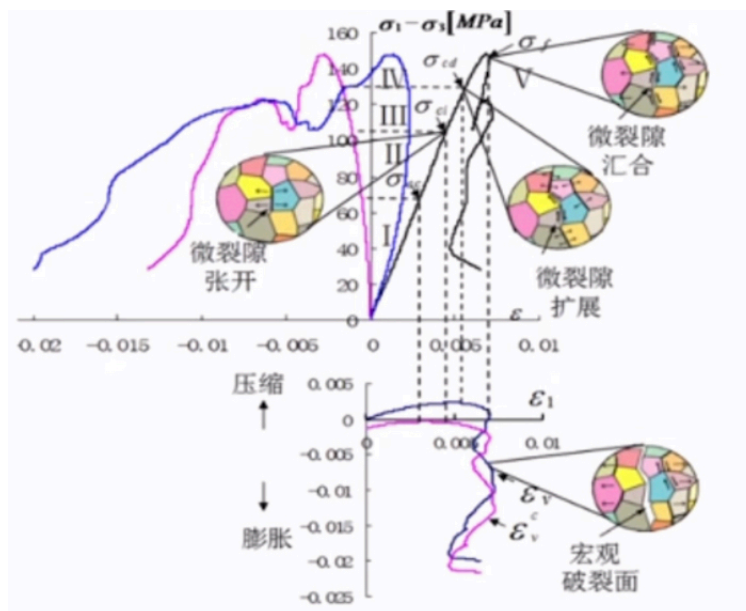


图 2: 扩容-破坏机理

裂隙发展演化等细观特征同岩石强度、应变软化、损伤局部化、韧脆转变、尺寸效应、破裂碎胀等宏观力学特征和破坏全过程的定量关系。

(2) TBM 卡机灾害孕育发生机理

研究了护盾区域挤压变形时空演化规律及其对卡机过程的控制作用，揭示了卡机致灾机理：TBM 开挖扰动—峰前损伤扩容 + 峰后破裂碎胀—挤压变形；当护盾区围岩变形量超过预留扩挖间隙—围岩接触挤压护盾—对护盾产生摩阻力 + 当 TBM 推力不足以克服护盾摩阻力时—护盾被卡。

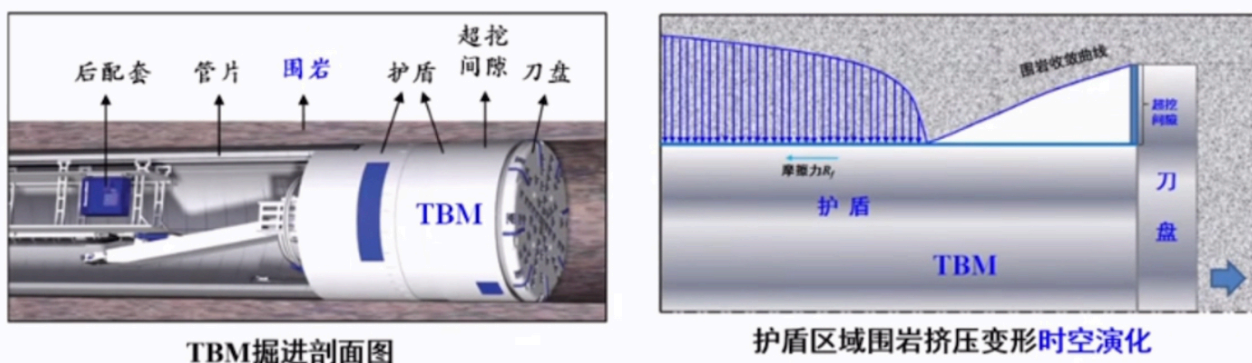


图 3: 卡机发生机理

以此建立了卡机状态判别准则：

$$\text{围岩对护盾挤压力 } P_s(y) = P^{+} = f_s(u_r(y)) = K_{sv}[u'_r(y) - (\Delta R + u_r(0))]$$

护盾所受摩阻力 R_f

$$F_r = 2\pi\pi R \cdot \left(\int_{y'}^{l^*} P_s(y) dl + P_{\max, s} \cdot (l_{\text{end}} - l^*) \right) + fW$$

TBM 卡机状态判别准则

$$F_r + F_b > F_I \rightarrow \text{卡机}$$

$$F_r + F_b \leq F_I \rightarrow \text{不卡机}$$

(3) 破碎软弱围岩挤压变形卡机分析预测 FDEM 方法：

1. 节理单元张拉和剪切渐进破坏模型：通过粘聚单元的起裂-扩展模拟岩体变形和破坏过程，实现连续向不连续介质转变，为围岩挤压大变形及卡机过程模拟提供有效解决途径。

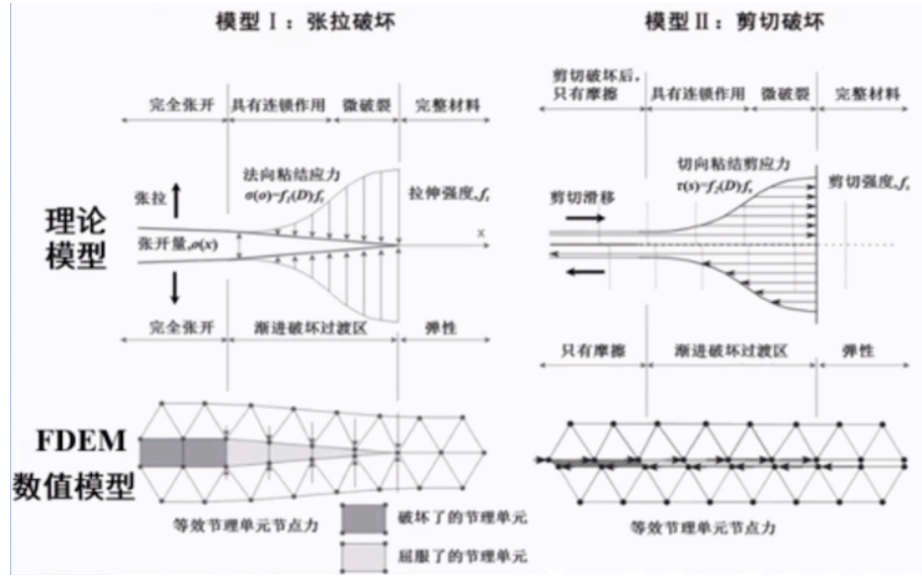


图 4: 张拉剪切破坏曲线

2. Munjiza-NBS 接触搜索：将计算区域划分为大小相等的方形格子，格子的尺寸必须大于最大的单元尺寸。将单元按照坐标对应到相应的格子中。为避免重复搜索，对于每一个格子只搜索其左边的一个格子和下方的三个格子内的单元。

3. 运动控制方程：根据单元节点力和节点质量，在每一时间步，通过二阶向前差分法求解运动方程得到节点的速度和位移，并更新节点坐标。运动方程基于牛顿第二定律，并加入了粘性阻尼：

$$\mathbf{M} \frac{\partial^2 \mathbf{x}}{\partial t^2} + \mathbf{C} \frac{\mathbf{x}}{t} = \mathbf{F} \quad (1)$$

(4) FDEM 的 GPU 并行计算

基于 CUDA 平台的 CPU 并行计算解决方案：CPU 几千个计算单元，浮点运算能力大。在合理优化下，使用 CUDA 并行计算平台对程序进行二次开发可使计算速度提高几十倍至上百倍，成本和功耗优势显著。

目标单元对 AB 边总的作用力可通过 AB 边上势分布的面积计算：

$$\mathbf{f}_{c,AB} = \frac{1}{\mathbf{u}^2} \mathbf{u} \int_0^L p\varphi(\mathbf{v}) d\mathbf{v} \quad (2)$$

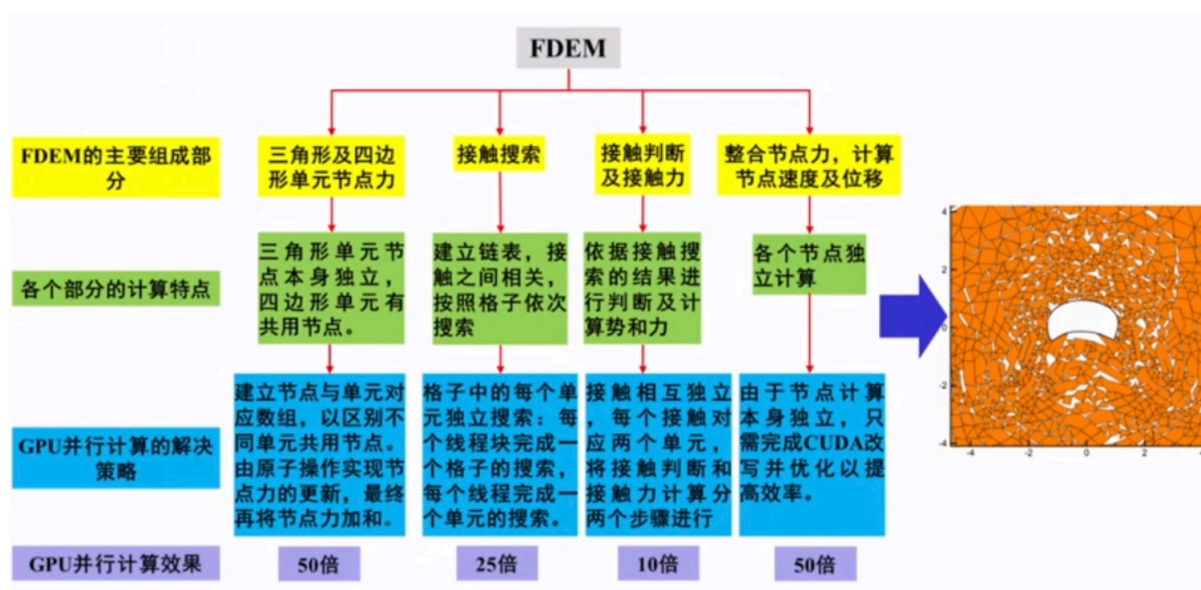


图 5: GPU 并行运算

2. 研究过程

(1) 深部软弱地层 TBM 卡机过程 FDEM 数值模拟:

二维模拟原理: TBM 设备的径向支撑作用; 模拟方法: 网格覆盖法、TBM 自重不可忽略; 优势: 能模拟卡机全过程、体现不均匀问隙; 长期停机下 TBM 卡机全过程模拟结果:

- 接触面积 (接触对) 不再增多, 但原有挤压应力进一步增大
- 长期响应下挤压应力 = 2 倍瞬时响应
- 正常掘进挤压应力 = 0.2 0.3 MPa

(2) 深部软弱地层坍塌失稳、挤压大变形卡机灾害安全控制技术:

1. TBM 卡机预防措施:

- 地质上: 超前注浆加固、超前管棚/小导管/锚杆加固等
- 设备制造上: 加大扩大间隙、缩短护盾长度、带锥度护盾、润滑孔、脱困电机等
- 设备使用上: 加快掘进速率、单护盾模式掘进 (针对双护盾 TBM) 等

2. 锚固支护的 FDEM 模拟方法:

锚杆、锚固剂、围岩, 直接建立实体模型, 锚杆发挥作用前, 属性与围岩一致, 参与围岩的变形破裂计算。锚杆发挥作用后, 消除已有应力, 采用对应属性计算。锚杆存在明显的屈服和应变硬化现象, 岩石本构方程不再适用, 试验建立新本构方程, 锚固剂仍采用岩石本构方程。

$$\sigma_b = \begin{cases} E_b \cdot \varepsilon_b, & \varepsilon_b < \varepsilon_y \\ \sigma_y, & \varepsilon_y < \varepsilon_b < \varepsilon_h \\ \sigma_y + K \cdot (\varepsilon_b - \varepsilon_h), & \varepsilon_b > \varepsilon_h \end{cases} \quad \tau_b = \begin{cases} G_b \cdot \gamma_b, & \gamma_b < \gamma_h \\ \tau_h + K \cdot (\gamma_b - \gamma_h), & \gamma_b > \gamma_h \end{cases}$$

3. 注浆支护控制的 FDEM 模拟方法:

浆液流通网络检索算法:

如图中所示与注浆孔相连接的部分线段代表从注浆孔产生的且已经被井入浆液运移扩散网络的失效的粘聚力单元，浆液即在这部分裂隙网络中运移。当在每一时步结束时，在浆液压力的作用下可能会有粘聚力单元失效，并产生新的裂隙将已有裂隙与现有浆液运移网络相连通。

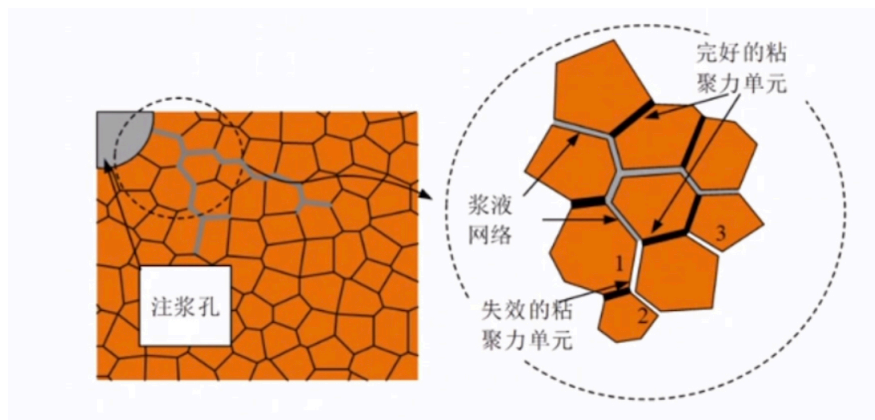


图 6: 注浆支护模拟

注浆完成后浆液的粘聚修复作用：

在浆液运移过程的模拟完成之后，记录下所有浆液的运移路径，将浆液运移路径上的失效粘聚力单元或者原生结构面上的粘聚力单元激活。目前注浆加固之后岩体的强度提升幅度，还缺乏相应的力学模型，因此目前只能以相关文献中的数据来作为重新加固后粘聚力单元强度赋值的依据。

(3) 数值仿真+物理模拟+现场试验

研究不同掘进状态参数和支护加固方案对不同变形等级区围岩挤压变形的控制规律，探索新型支护形式。

1. 无挤压变形（1级）：无卡机风险。方案：不需扩挖，采用正常的 TBM 掘进参数和常规支护技术通过：一次支护+二衬。
2. 轻微挤压变形（2级）：挤压变形量较小，发展较缓慢，轻微卡机风险。方案：适当扩挖+预应力锚杆+钢拱架+钢筋排支护。
3. 中等挤压变形（3级）：中等卡机风险。方案：超前锚杆+小变径扩挖预留变形量+匀速不间断掘进快速通过，减轻时效变形影响+掘进后及时施作“钢筋排+钢拱架+预应力锚杆/索+喷射混凝土支护”。
4. 严重挤压变形（4级）：严重卡机风险。“大变径扩挖+掘进参数调整+分步联合支护”控制技术：人工扩挖旁洞、开挖超前导洞，更换刀盘大变径扩挖（直径 6.5m—6.83m）+启动脱困电机、降低刀盘转速提高刀盘扭矩和主驱动推力+“超前管棚+预注浆加固”+“钢筋排+可缩式钢拱架+喷射混凝土+预应力锚杆”+“预应力注浆锚索+分步注浆”。
5. 极严重挤压变形（5级）：停止 TBM 掘进并适当后退，改矿山法绕挖后扩挖到直径 7.15m，加强型分步联合控制技术：“超前预注浆+超前管棚”超前加固掌子面前方岩体；“格栅拱架双层钢筋网喷射混凝土”一次支护实现工作面安全防护；“高强预应力注浆锚杆+预应力注浆锚索+分步注浆”锚注一体化支护技术实现围岩应力状态恢复改善、自承载能力增强、破裂损伤固结修复和应力峰值向深层转移。