

绍兴论坛“岩土工程中国软件”讲座

SMRM工程岩体参数计算系统

SMRM CALCULATION

绍兴文理学院·浙江岩创科技

<http://www.rockinnov.com/>

2020. 12. 23 绍兴

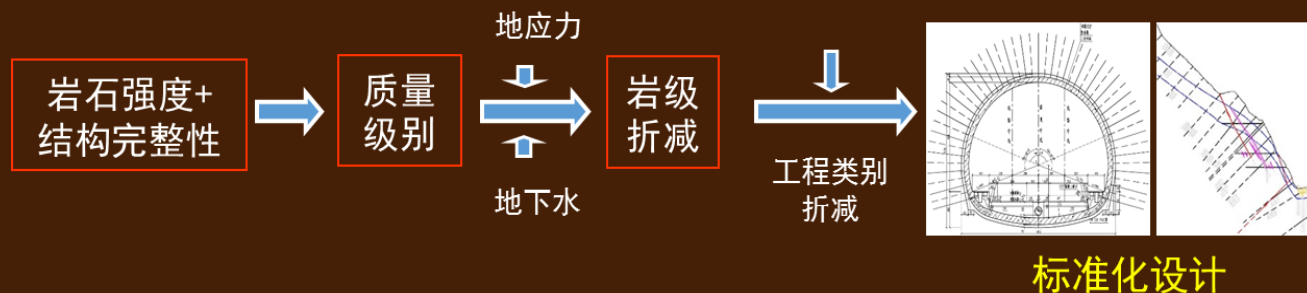
报告提纲

- SMRM系统概述
- SMRM岩体参数计算系统

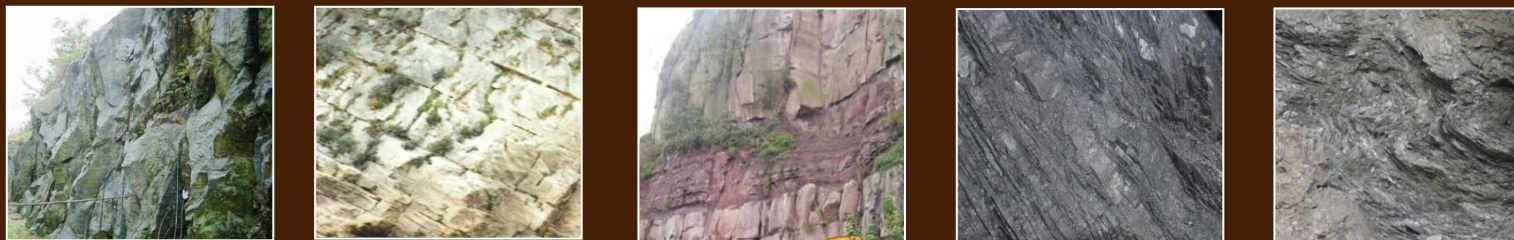
一、SMRM系统概述

1. 为什么要做岩体参数计算系统

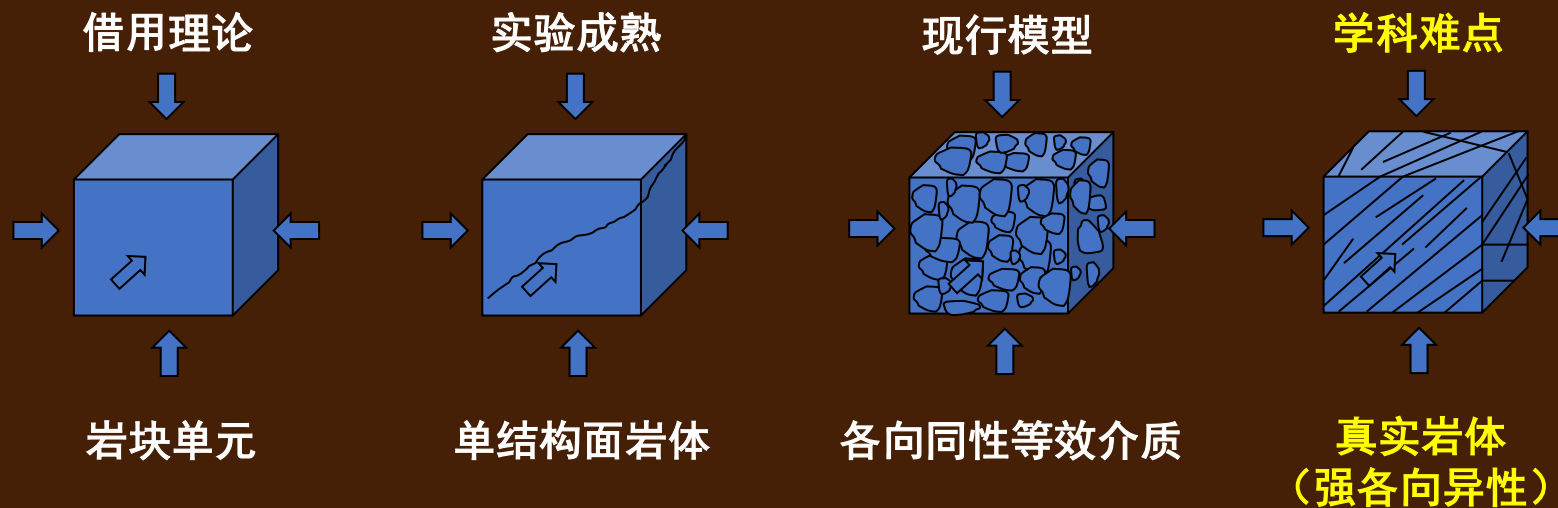
- 岩土工程设计应是以参数为基础的计算设计。
- 力学计算复杂困难，数值计算又未纳入规范体系。
- 已有较多数值计算软件，但尚没有参数计算软件。
- 目前以质量分级为基础的标准化设计并获取参数：



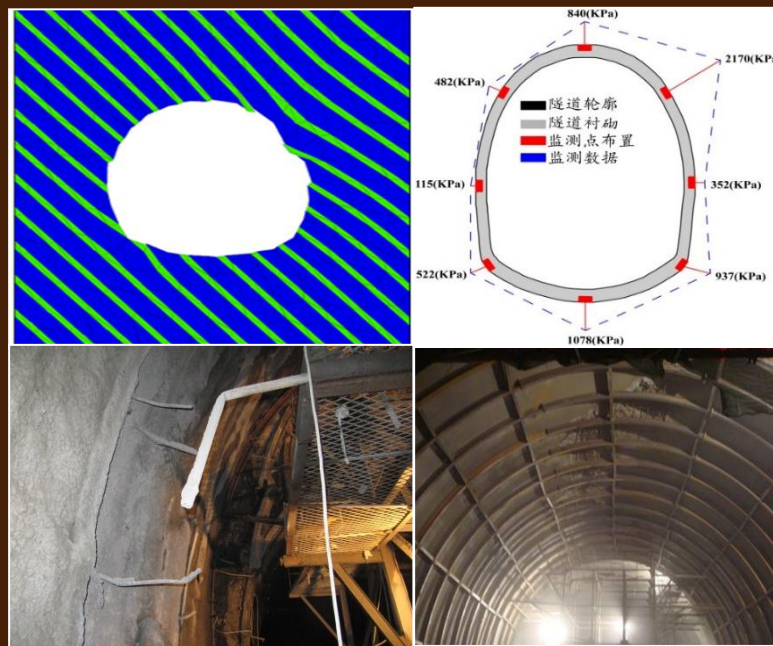
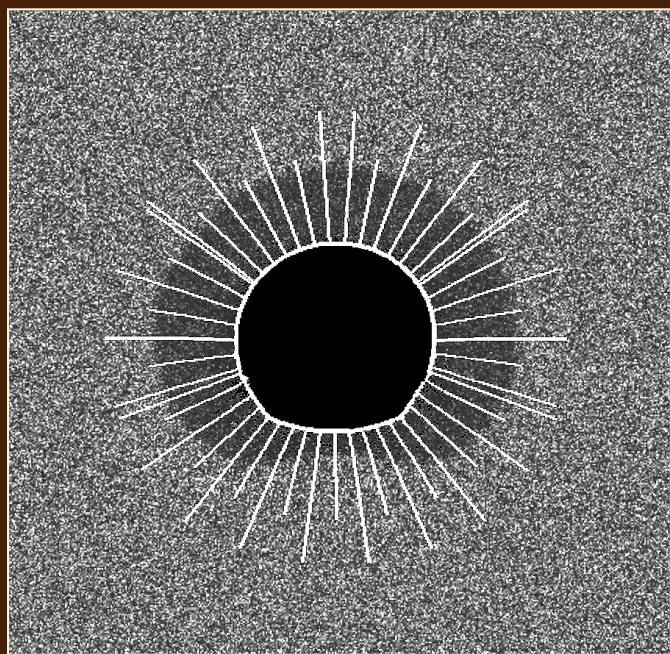
• 真实岩体工程性质的参数描述:



• 研究与应用现状:



- 岩体变形破坏的各向异性特征与各向同性折减的矛盾，导致岩体设计参数可靠性差



建设在强各向异性岩体中的某铁路全线隧道设计变更比例达**30%以上**，总投资增加超过**200亿元**。

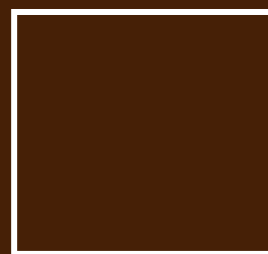
1. 岩体参数计算的理论基础

- 统计岩体力学的概念模型

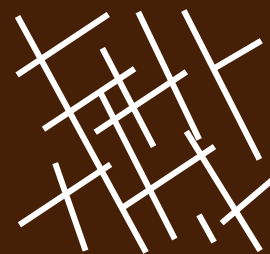
- 统计岩体力学不是岩体的统计学方法；
- 岩体结构几何概率+断裂力学→等效连续介质力学。



岩体单元

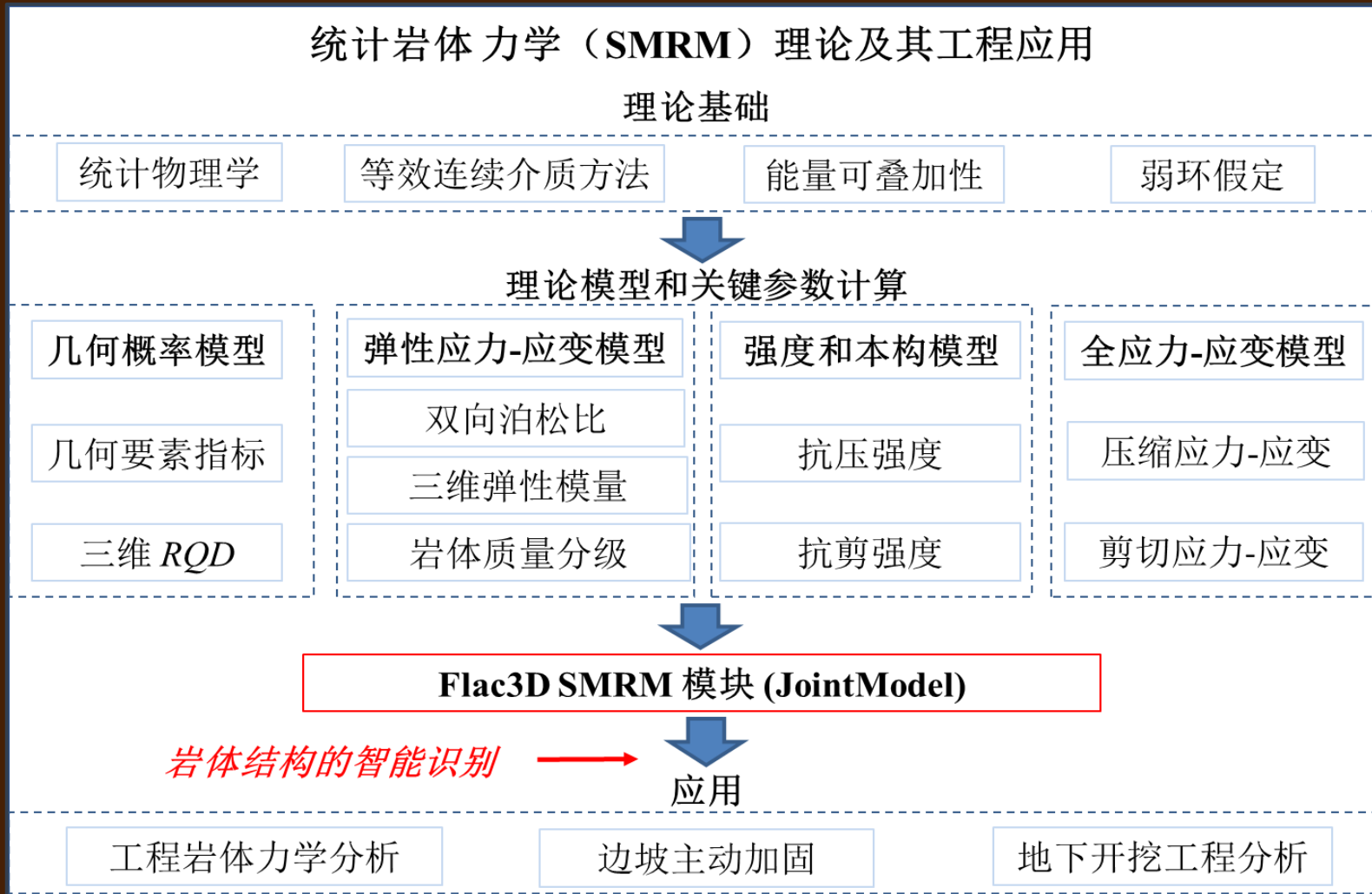


岩石块体



随机结构面

• SMRM岩体参数计算系统基本框架



3. SMRM系统可计算的岩体参数

- 测试数据处理；
- 岩体结构参数；
- 岩体变形参数；
- 岩体强度参数；
- 岩体渗透性参数；
- 岩体质量分级；
- 参数应用分析。

4. 系统成长历程

- 1985-2010, 工程问题驱动理论建立



兰渝铁路新城子隧道



吉图珲铁路小盘岭隧道



锦屏二级水电站引水隧洞



长江三峡工程高切坡



锦屏一级水电站高边坡

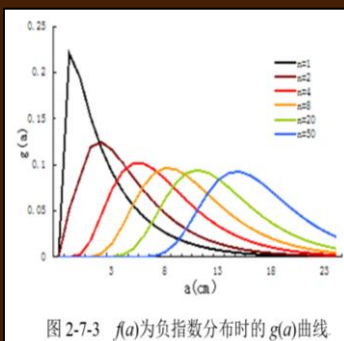


澜沧江小湾水电站

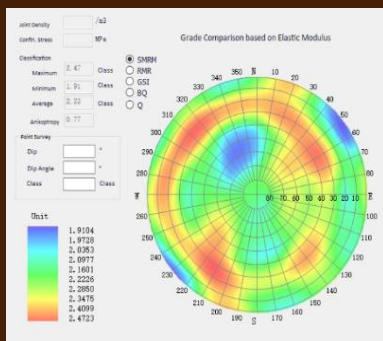


刚果宗果II水电站

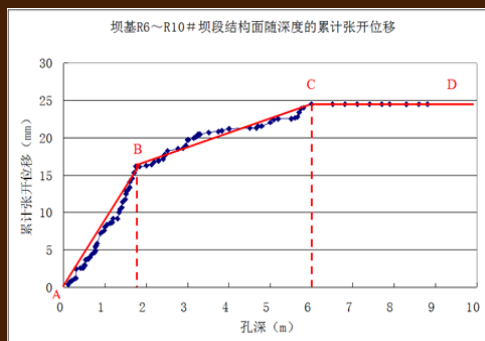
2001-2015, 水电、铁路工程应用检验 系列功能模块软件开发



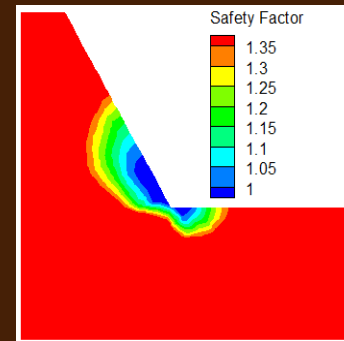
岩体结构分析



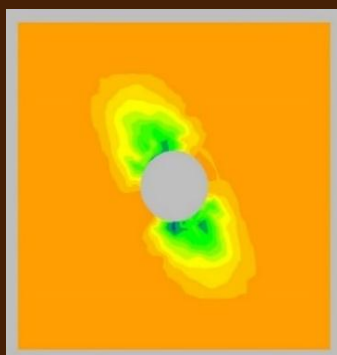
岩体质量评价



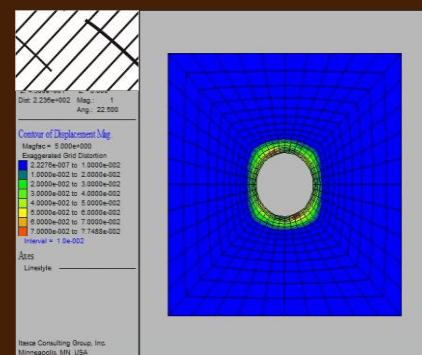
边坡卸荷分带



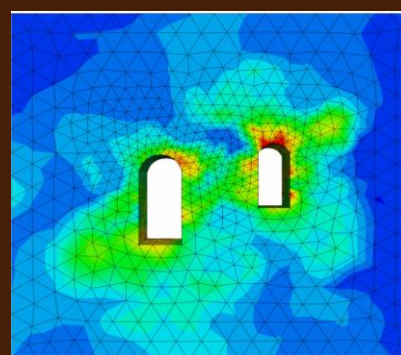
边坡主动加固



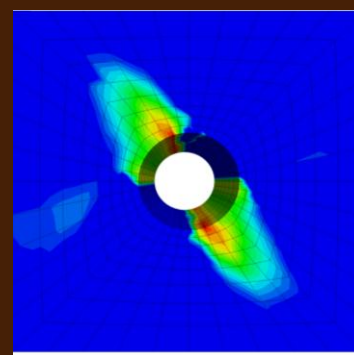
围岩破坏概率



围岩非对称变形



围岩岩爆分析



围岩主动加固

- 2015-2020, 单机版与网络版软件

前、后端发展：测试、数采、云平台



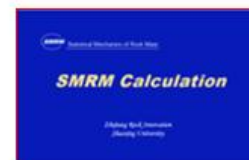
手机-服务器无线数据传输



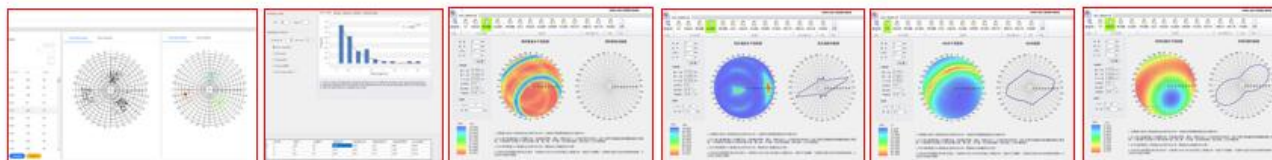
SMRM计算单机版



SMRM参数计算Beta版

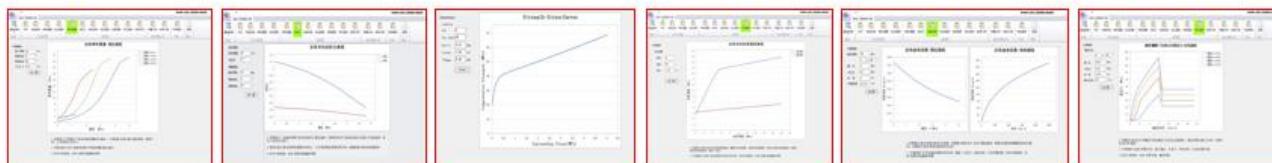


SMRM网络版

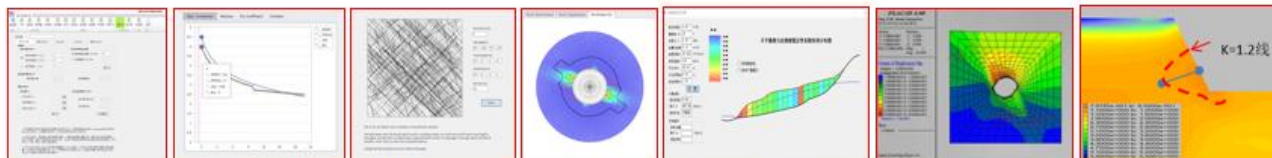


岩体结构数据处理

全方向岩体工程参数计算：RQD、模量、强度、渗透系数



岩体工程参数曲线计算：模量、双向泊松比、抗压强度、双向抗剪强度、渗透系数、全过程变形曲线



岩体质量分级与参数对比

网络模拟

解析解计算

工程问题计算

数值分析应用拓展计算

• 代表性成果



- **软件研发团队：**

伍法权 伍 劼 包 含 李星星

孔德珩 郝鹏程 王立明 岳西蒙

龙泱君 王兆远 李 博 沙 鹏

胡秀宏

- **感谢支持：**

陈育民 谢云飞

二、SMRM岩体参数计算系统

1. 便捷、智能的SMRM一站式服务平台



智能背包实验室



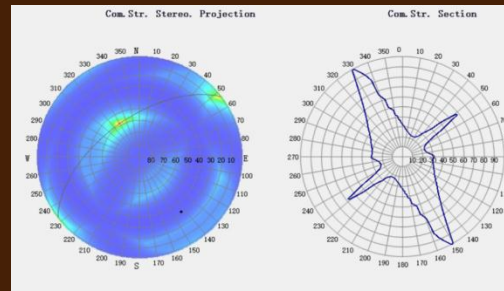
“电子野簿” APP



SMRM参数计算系统

计算成果展示形式

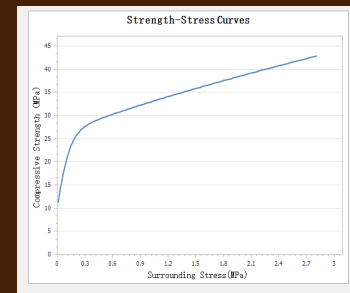
- 赤平投影图
- 切面玫瑰图
- 曲线图
- 数据图表
- 分布云图



赤平投影

切面玫瑰

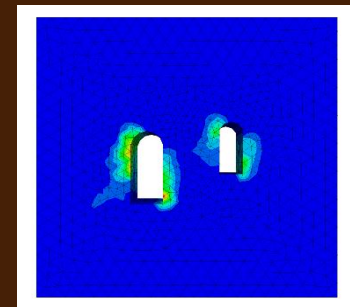
图



曲线图



数据图表

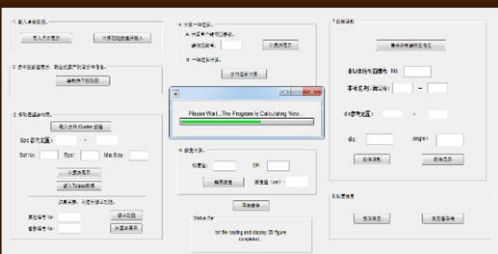


分布云图

2. 岩体结构非接触式测量与解算

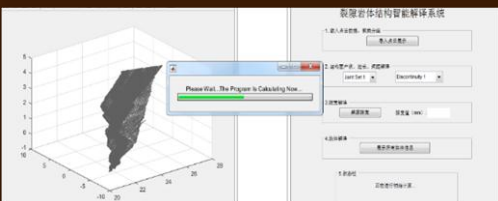


非接触测量
与点云获取

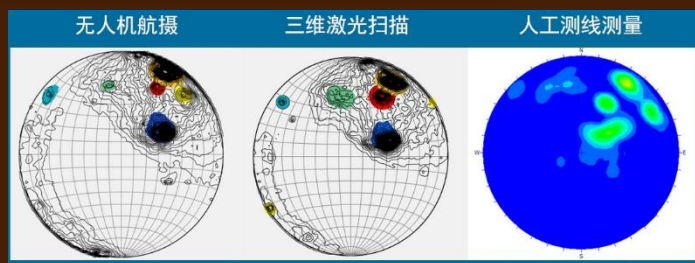


岩体结构识别
系统(专业型)

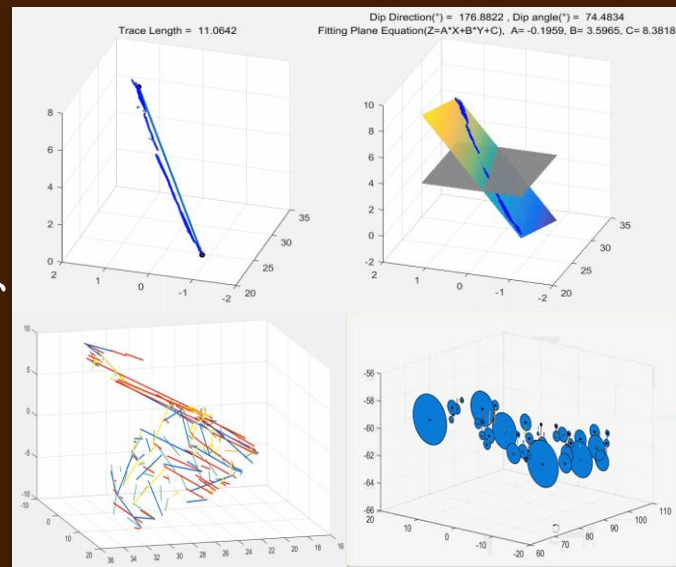
结构面迹长、
间距、网络
识别



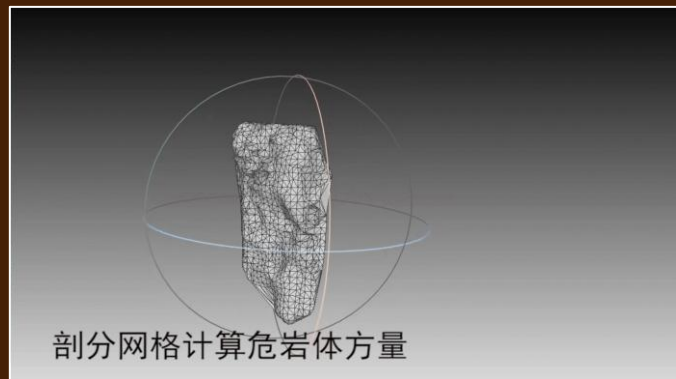
岩体结构识别
系统(普及型)



结构面
分组



危岩块体
识别



3. 岩体结构参数计算

- 节理组：组数、产状、密度、半径、隙宽、强度

- 概率密度

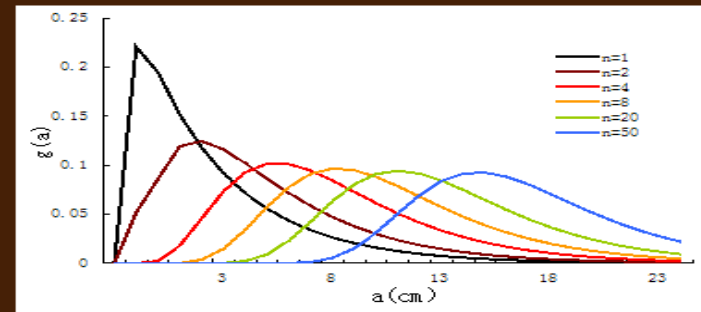
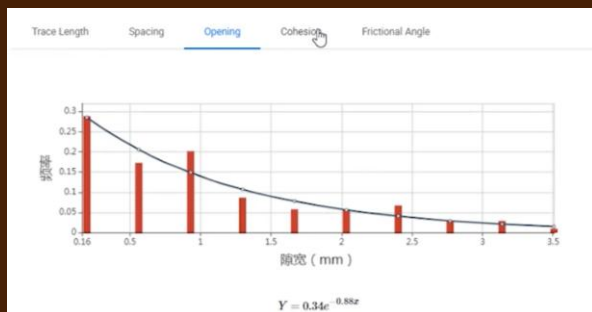
$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x}$$

- 半径分布与均值

$$f(a) = \frac{\pi}{2} \mu e^{-\frac{\pi}{2} \mu a} \quad \bar{a} = \frac{2}{\pi \mu} = \frac{2}{\pi} \bar{l}$$

- 最大半径

$$a_m = \bar{a} \ln(\lambda_v \cdot V) = \bar{a} \ln\left(\frac{\lambda}{2\pi\bar{a}^2} V\right)$$



- 岩体结构几何概率模型

- 节理面积密度

$$\lambda_s = \mu\lambda$$

- 节理体积密度

$$\lambda_v = \frac{2}{\pi^3} \sum^m \mu^2 \lambda = \frac{1}{2\pi} \sum^m \frac{\lambda}{\bar{a}^2}$$

- 体积连通率

$$\eta_{ji} = \pi \lambda_{vj} \bar{t}_j (\bar{a}_j + r_j)^2 e^{-\frac{3r_j}{\bar{a}_j}}$$

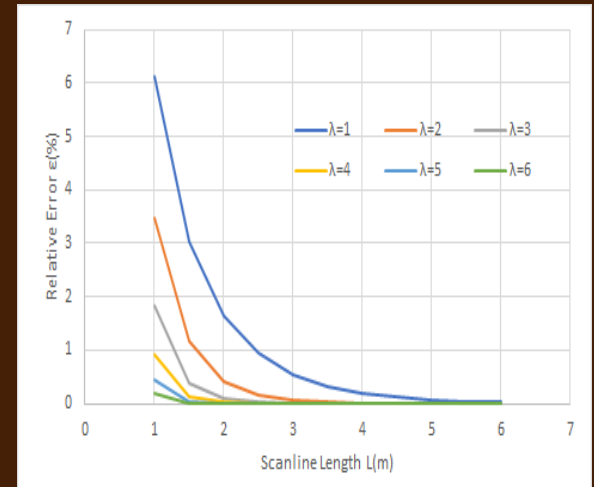
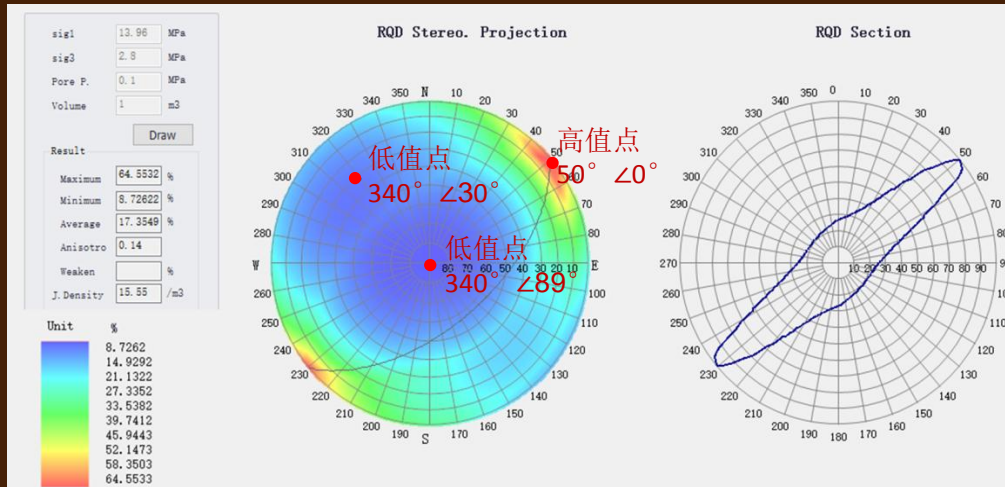
- *RQD*

$$RQD = \frac{e^{-\lambda t} - e^{-\lambda L}}{1 - e^{-\lambda L}} = e^{-\lambda t}$$

各向异性指数

$$\xi_{RQD} = \frac{RQD_{mmin}}{RQD_{mmax}}$$

例: RQD 计算:



• 区间值

$$RQD = 8.73 \sim 64.6\%$$

误差、REV与测线长L关系

• 均值

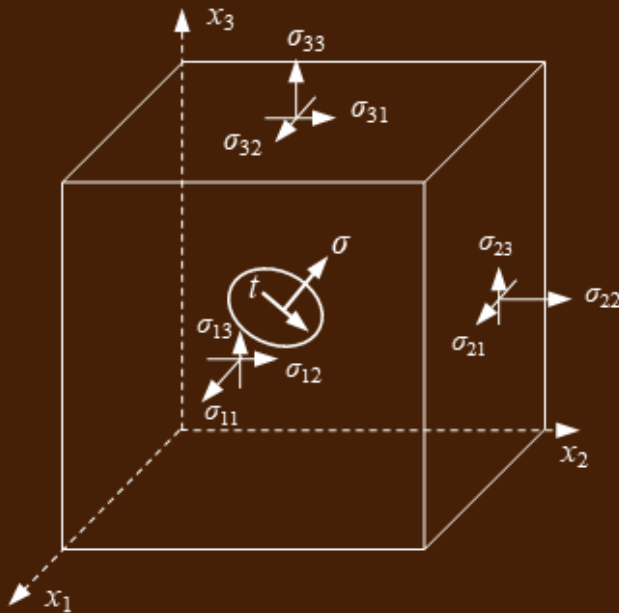
$$RQD_{ave} = 17.35\%$$

• 各向异性指数

$$\xi_{RQD} = \frac{RQD_{mmin}}{RQD_{mmax}} = 0.14$$

4. 岩体变形参数计算

- 岩块和结构面应变能叠加 → 岩体应力应变关系



$$u = u_0 + \sum_{i=1} u_{ci}$$

$$e_{ij} = (C_{0ijst} + C_{cijst})\sigma_{st}$$

$$C_{0ijst} = \frac{1+\nu}{2E}(\delta_{is}\delta_{jt} + \delta_{it}\delta_{js}) - \frac{\nu}{E}\delta_{ij}\delta_{st}$$

$$C_{cijst} = \frac{\alpha}{E} \sum_{i=1}^m \lambda \bar{a} [k^2 n_i n_t + \beta h^2 (\delta_{it} - n_i n_t)] n_j n_s$$

- 岩体全方向弹性模量计算

- 弹性模量计算公式

$$e_{ij} = C_{ijst} \cdot \sigma_{st} = (C_{0ijst} + C_{cijst}) \cdot \sigma_{st}$$

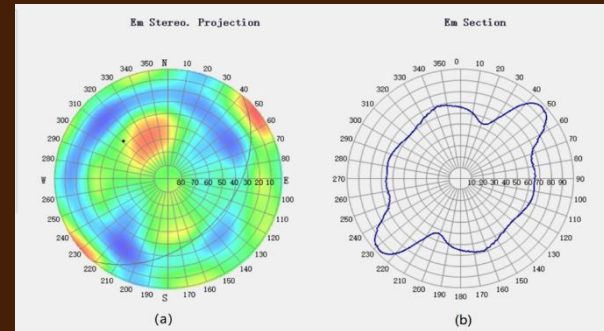
$$e_{11} = C_{1111} \sigma_{11} \quad E_m = \frac{\sigma_{11}}{e_{11}} = \frac{1}{C_{1111}}$$

$$E_m = \frac{E}{1 + \alpha \sum \lambda \bar{a} [k^2 n_1^2 + \beta h^2 (1 - n_1^2)] n_1^2}$$

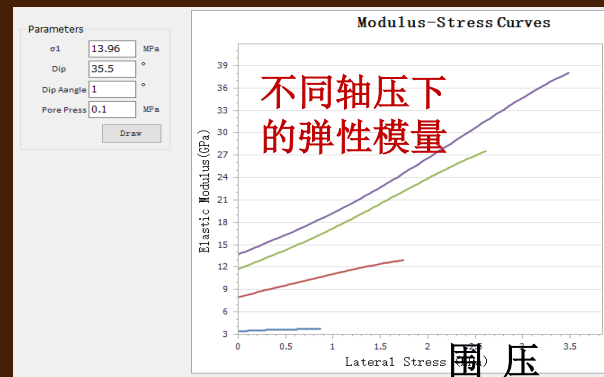
- 弱化系数与各向异性指数

$$\zeta_E = \frac{E_m}{E} \quad \xi_E = \frac{E_{mmin}}{E_{mmax}}$$

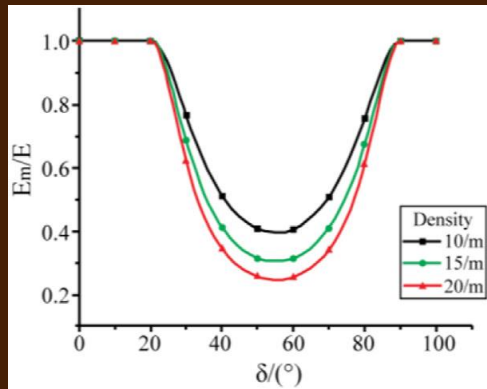
- 赤平投影与切面玫瑰图



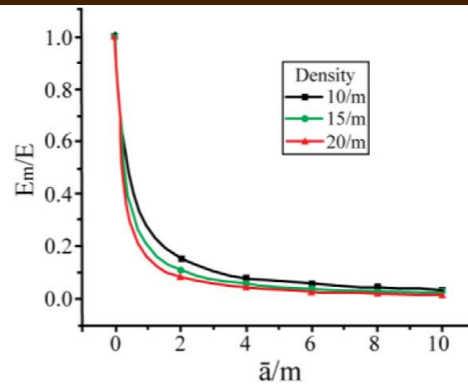
- 弹性模量随围压的变化



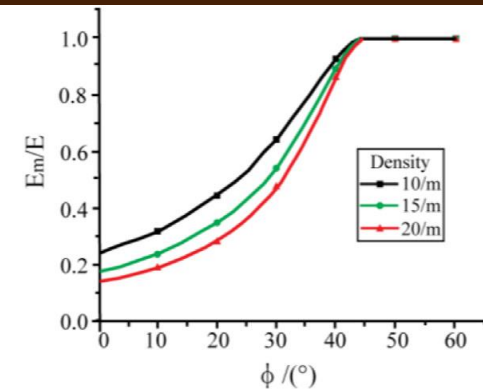
影响 E_m/E 的因素:



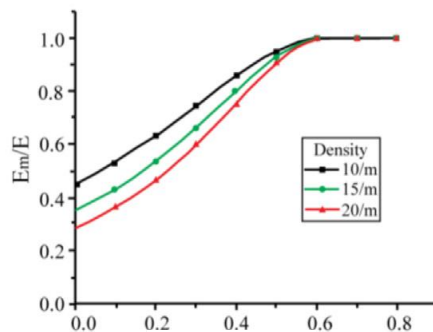
倾角分布



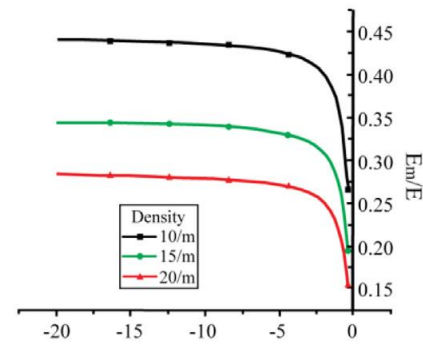
节理密度



内摩擦角

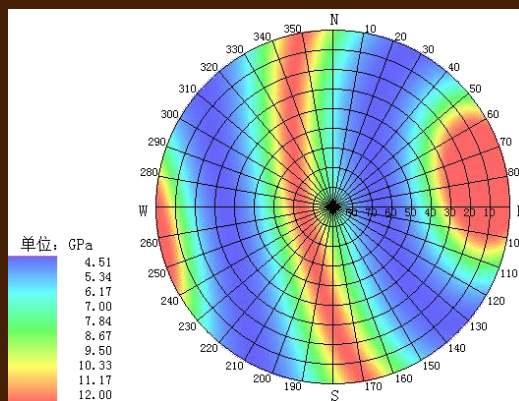


内聚力

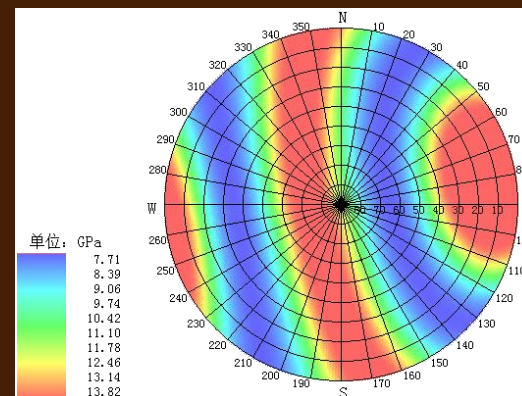


应力状态

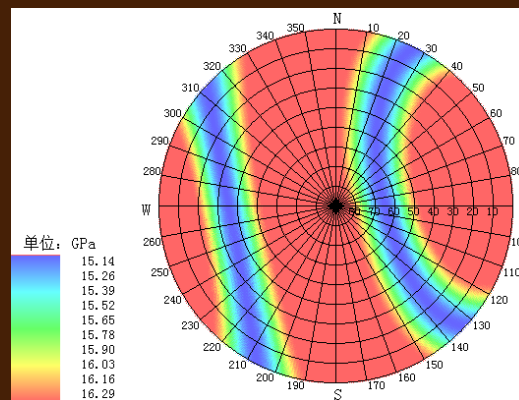
围压增加则
岩体变形性
质各向异性
降低



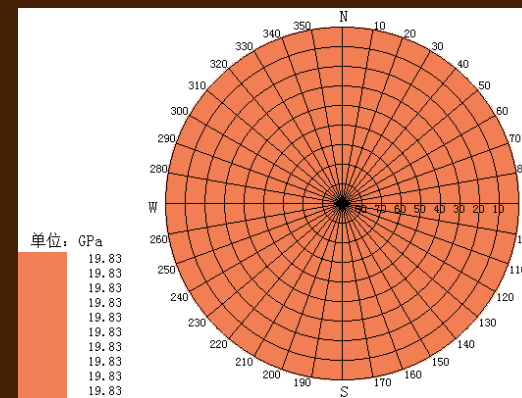
a. $\sigma_3=0\text{MPa}$



b. $\sigma_3=1\text{MPa}$



c. $\sigma_3=2\text{MPa}$



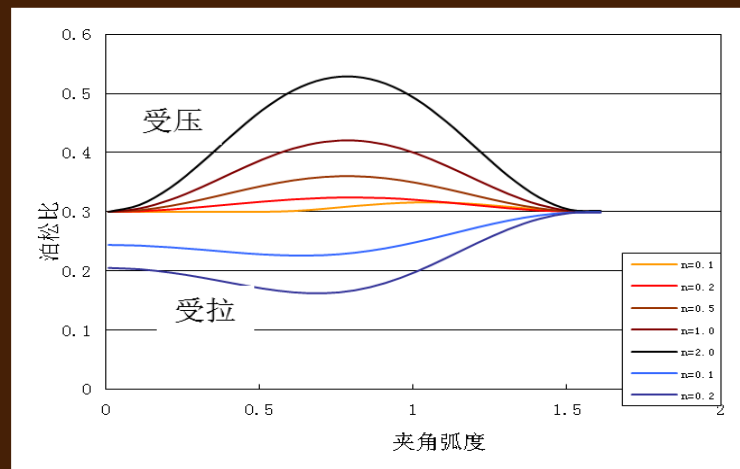
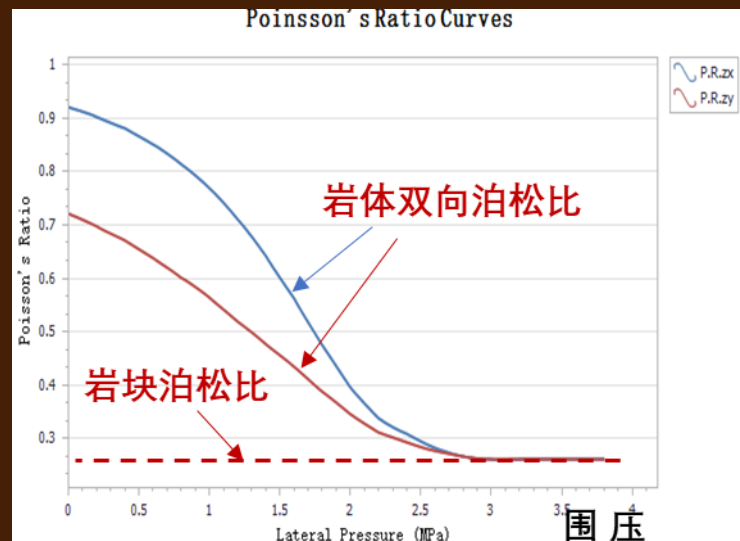
d. $\sigma_3=3\text{MPa}$

岩块参数		结构面参数					
E/GPa	ν	λ n/m ⁻¹	半径均值 /m	倾向 /°	倾角 /°	摩擦角 /°	粘聚力 /MPa
12	0.3	20	0.12	260	76	19	0.001

- 双向/拉压泊松比与大/小泊松比效应

$$\begin{cases} \nu_{21} = -\frac{C_{2211}}{C_{1111}} \\ \nu_{31} = -\frac{C_{3311}}{C_{1111}} \end{cases}$$

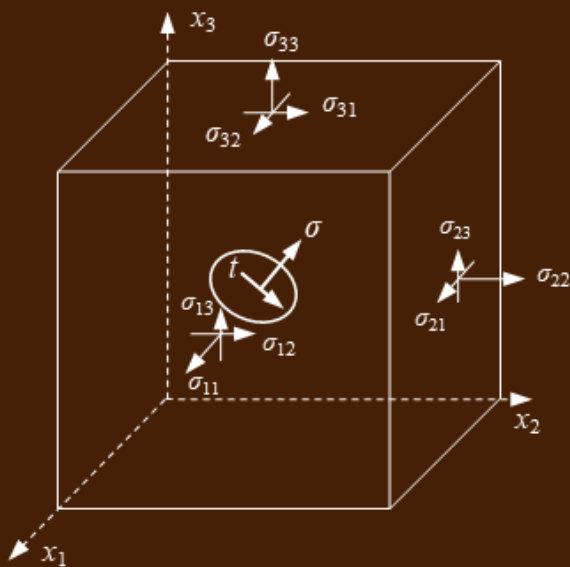
$$\begin{cases} C_{1111} = \frac{1}{E} \left[1 + \alpha \sum_{p=1}^m \lambda \bar{a} (k^2 n_1^2 + \beta h^2) n_1^2 \right] \\ C_{2211} = \frac{1}{E} \left[-\nu + \alpha \sum_{p=1}^m \lambda \bar{a} (k^2 - \beta h^2) n_1^2 n_2^2 \right] \\ C_{3311} = \frac{1}{E} \left[-\nu + \alpha \sum_{p=1}^m \lambda \bar{a} (k^2 - \beta h^2) n_1^2 n_3^2 \right] \end{cases}$$



5. 岩体强度参数计算

- 弱环假说：岩块与结构面强度的最小值

→ 岩体强度与破坏概率



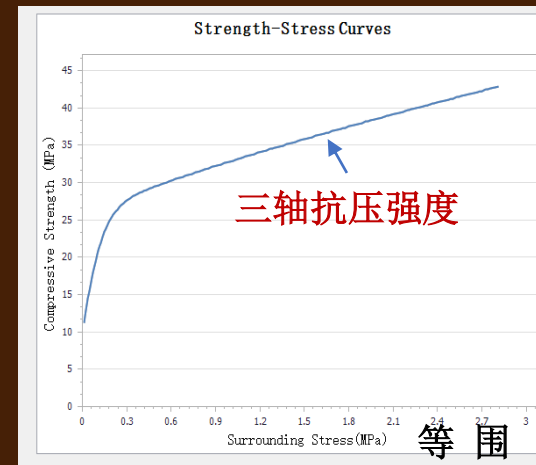
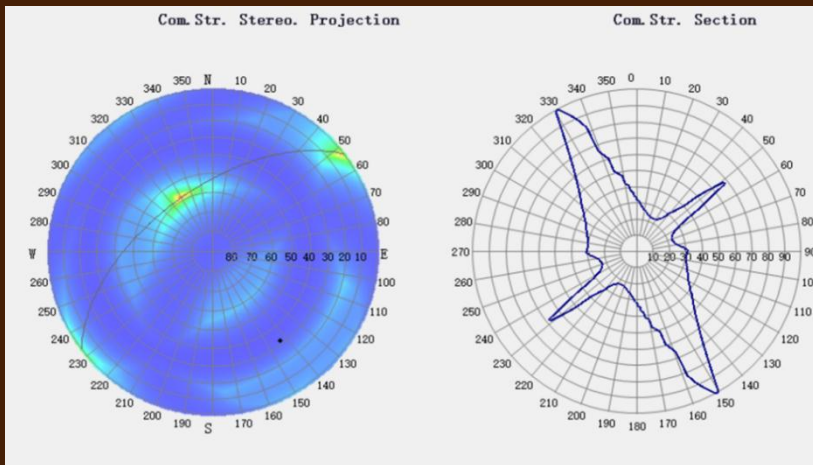
$$\sigma_1 = T_0 \sigma_3 - R_0$$

$$K_{Ic}^2 = \frac{4}{\pi} a_m (k^2 \sigma^2 + \beta \tau^2)$$

$$P = 1 - e^{-kV\sigma_{cm}^m} \prod_{i=1}^N (1 - e^{-\frac{a_{ci}}{a_i}})^{\lambda_{vi}V}$$

• 岩体库伦三轴抗压强度的统一表达式

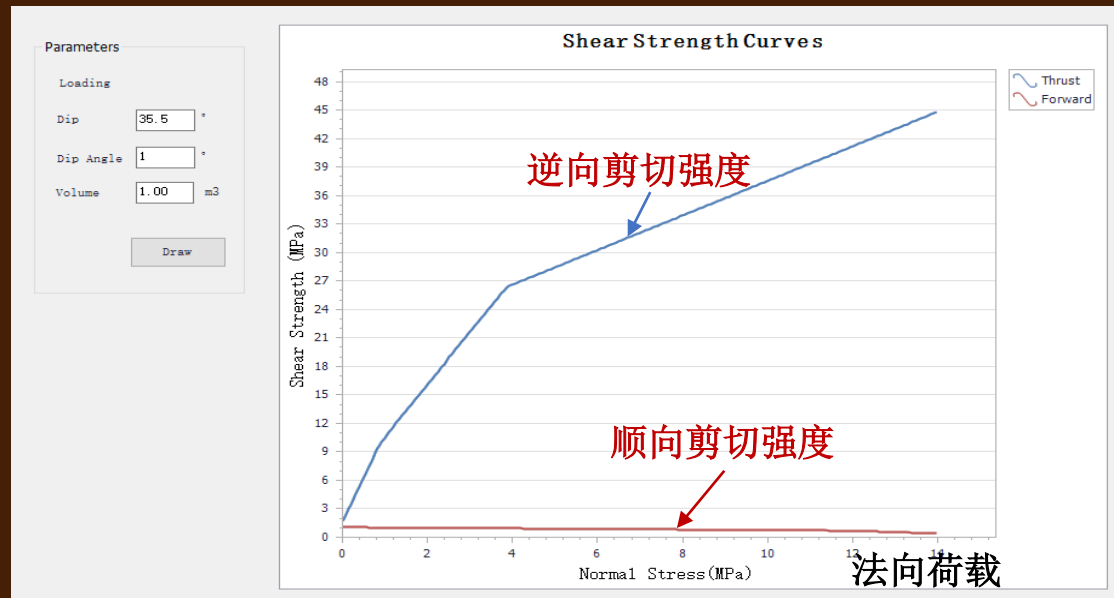
$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_1 = \min(T_i \sigma_3 - R_i), \quad i = 0, 1, 2, \dots, m \\ T_0 = \tan^2 \theta, \quad R_0 = \sigma_c, \quad \theta = 45^\circ + \frac{\phi_0}{2}; \\ T_i = \frac{\tan \delta}{\tan(\delta - \phi)}, \quad R_i = \frac{1 + \tan^2 \delta}{\tan \delta - \tan \phi} \left(\frac{K_{Ic}}{2} \sqrt{\frac{\pi}{\beta a_m}} + c \right) \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} i=0, \text{ 岩块} \\ i=1 \sim m, \text{ 节理组} \end{array}$$



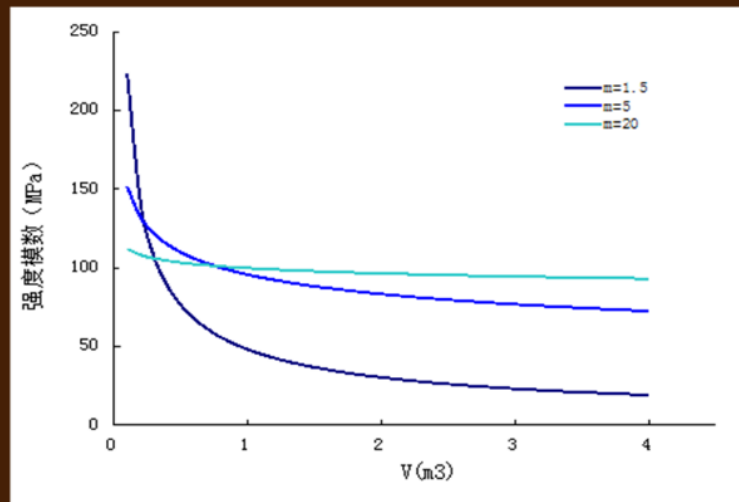
等围压

- 岩体双向库伦抗剪强度

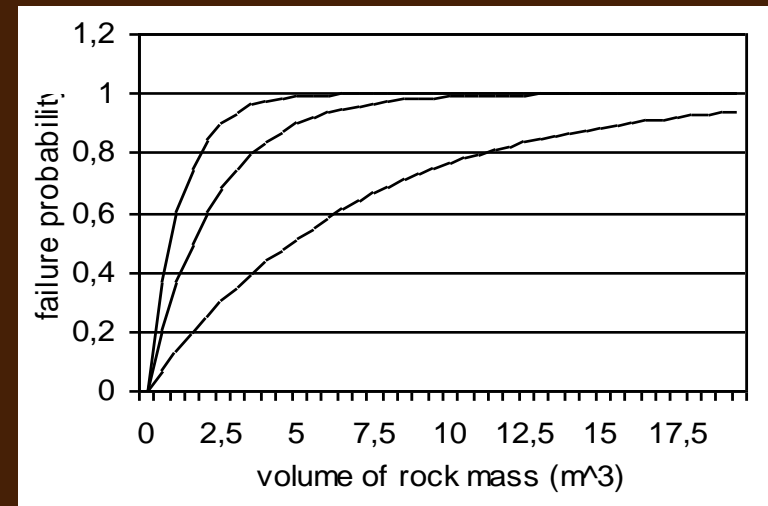
$$\sigma_{13} = \min \left\{ \begin{array}{l} \tan(\varphi \pm \delta)\sigma + \frac{1}{\cos^2 \delta(1 \mp \tan \delta \tan \varphi)} \left(c + \frac{K_{Ic}}{2} \sqrt{\frac{\pi}{\beta a_m}} \right) \\ \sigma_{33} \tan \varphi_0 - c_0 \end{array} \right.$$



- 岩体强度与破坏概率的体积效应：

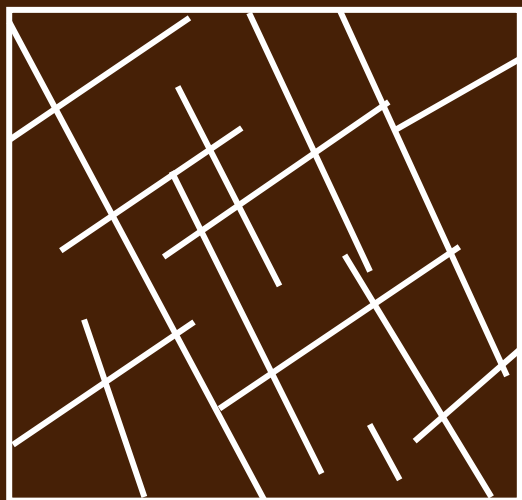


岩体强度的体积效应



岩体破坏概率的体积效应

6. 岩体渗透性参数计算



结构面网络

- 结构面连通率 → **岩体渗流模型**

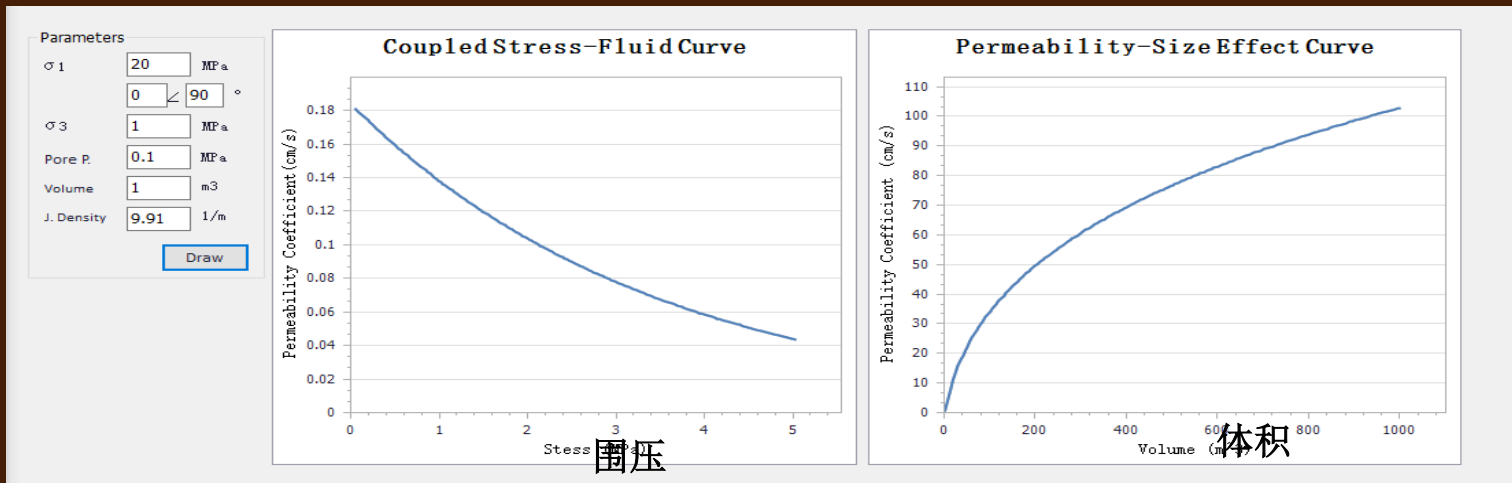
连通率: $\eta = \pi \lambda_v \bar{t} (\bar{a} + r)^2 e^{-\frac{3r}{\bar{a}}}$

连通半径: $r \geq \frac{1}{2\lambda_i \sin\theta}$

渗透张量: $K_{ij} = \frac{g}{12\nu} \sum \bar{t}^2 \eta (\delta_{ij} - n_i n_j)$

• 岩体渗透性的水岩耦合与尺寸效应

- 水-岩耦合
$$K = \frac{\pi g}{12\nu} \sum \lambda_v \bar{t}_0^2 \eta (\delta_{ij} - n_i n_j) m_i m_j e^{-\frac{3\sigma}{k_n}}$$
- 尺寸效应
$$K = \frac{\pi g}{12\nu} \sum \lambda_v \bar{t}^2 \eta (\delta_{ij} - n_i n_j) m_i m_j \ln^3 (\lambda_v V)$$



7. 岩体质量分级与经验参数计算

- 基本关联路径

Em--RMR	$RMR = \frac{1}{2}(E_m + 100)$	$E_m > 10GPa$	
	$RMR = 40 \lg E_m + 10$	$E_m \leq 10GPa$	
RMR--Q, BQ	$RMR = 9 \ln Q + 44$		
	质量级别	RMR	BQ
	I	>80	>550
	II	60~80	451~550
	III	40~60	351~450
	IV	20~40	250~350
V	<20	<250	

• 各类岩体质量分级系统



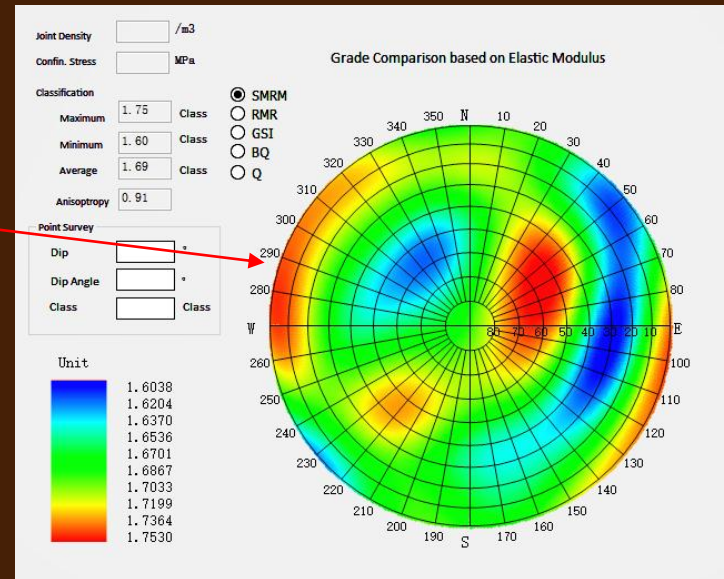
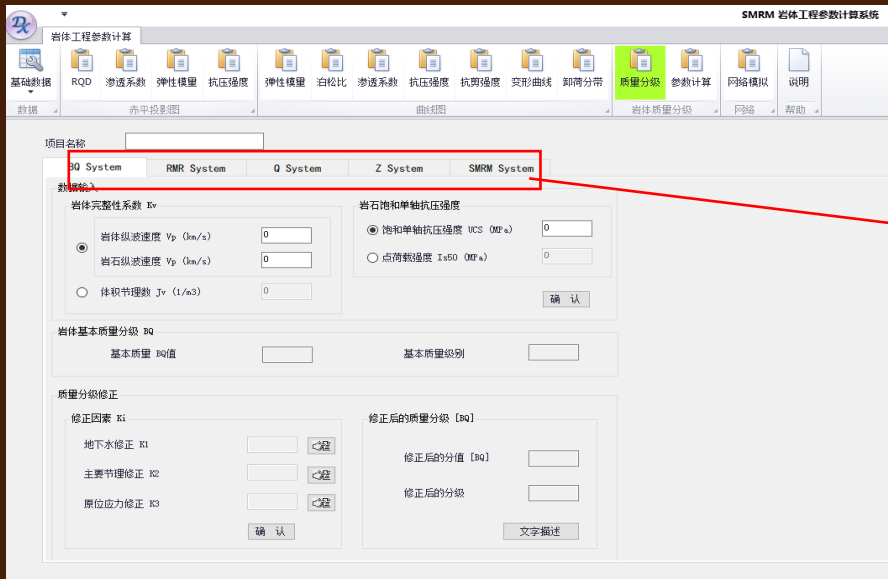
BQ分级

RMR分级

Q分级

Z分级

SMRM分级



岩体SMRM质量全方向分布

岩体质量分级 与岩体参数

SMRM 岩体工程参数计算系统

基础数据 RQD 渗透系数 弹性模量 抗压强度 弹性模量 泊松比 渗透系数 抗压强度 抗剪强度 变形曲线 荷载分带 质量分级 参数计算 岩体质量分级 网络 帮助

数据 赤平投影图 曲线图

书理密度 /m³
围压 MPa

岩体质量分级
最大值 2.12 级
最小值 1.87 级
平均值 1.93 级

指向异性
点查询
侧向
倾斜
级别

Unit
1.8702
1.8985
1.9267
1.9550
1.9833
2.0115
2.0398
2.0681
2.0964
2.1246

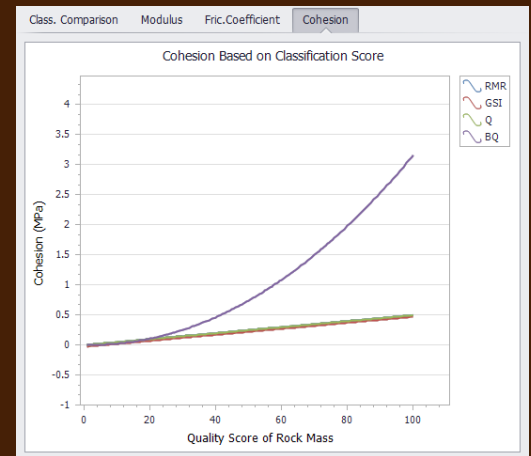
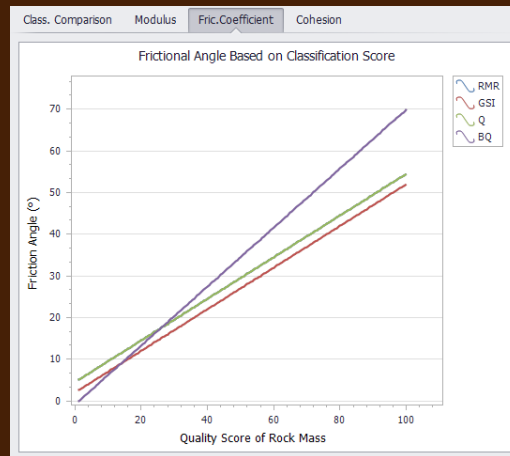
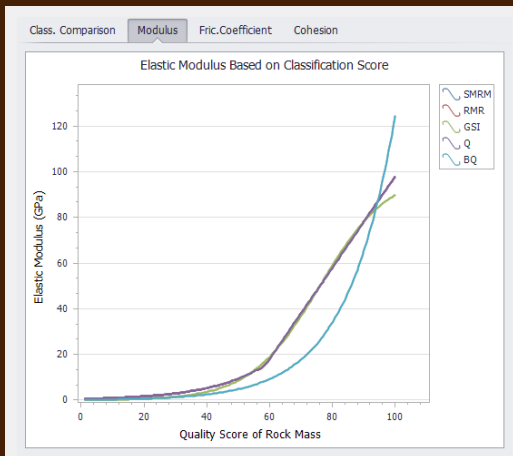
基于弹性模量的岩体质量分级

Class. Comparison Modulus Fric.Coefficient Cohesion

基于弹性模量的岩体质量级别

1. 赤平投影图显示基于岩体弹性模量的岩体质量分级。
2. 选择不同分级方法按钮，计算相应的岩体质量分级。
3. 点击赤平投影图区域任意位置，获取该点方向的岩体质量级别，并显示在“点查询”区域。

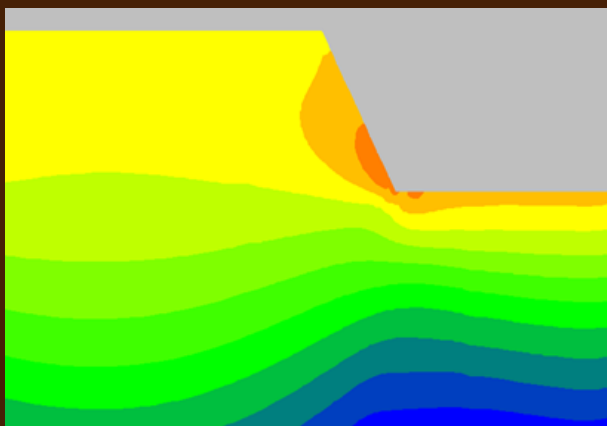
1. 第一图框为基于弹性模量的各类岩体质量分级比较，曲线采用相应的统计经验关系式计算获得。
2. 其余3个图框分别是显示基于各类质量分级分值（100分制）的岩体弹性模量、摩擦角和粘聚力，其中RMR与Q之间由于存在经验关系而重合。
3. 点击作图区上部按钮切换曲线类型。



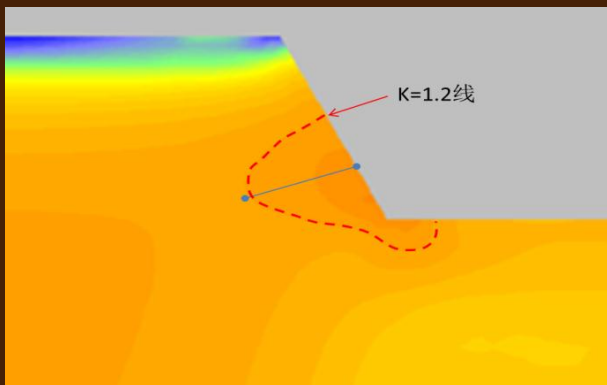
8. 岩体参数空间分布数值计算

- FLACD JointModel发展了一系列功能
 - SMRM各向异性介质
 - 传统功能：位移场、应力场
 - 岩体模量与质量分级点云
 - 破坏概率、破坏应力余量（岩爆）点云
 - 稳定性系数、加固需求度点云

- JointModel 计算示例



边坡加固需求度



边坡稳定性系数点云图

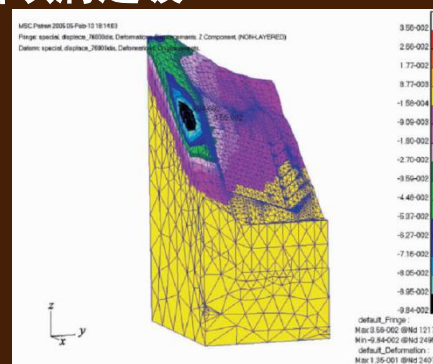
国内外成功工程案例



刚果（金）宗果II水电站
右坝肩边坡

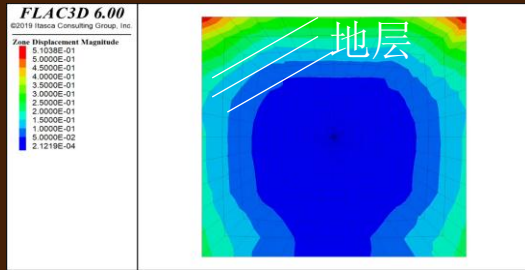


云南蜡寨水电站右岸边坡

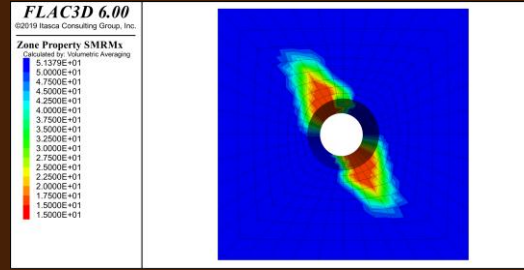


- 岩体地下空间计算：兰渝铁路隧道

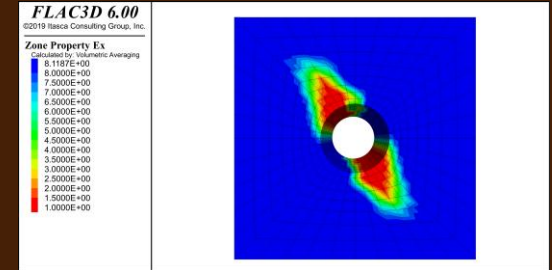
单斜地层，埋深500m，对称应力边界条件



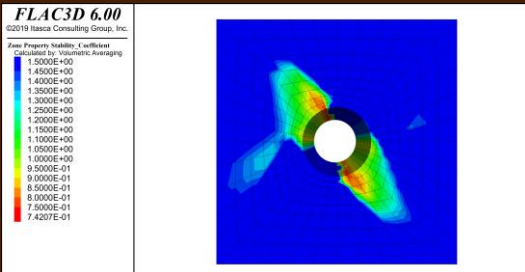
非对称位移分布



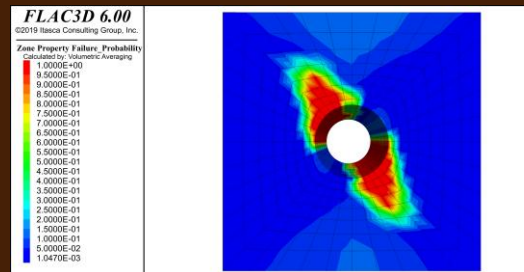
岩体质量等级分布



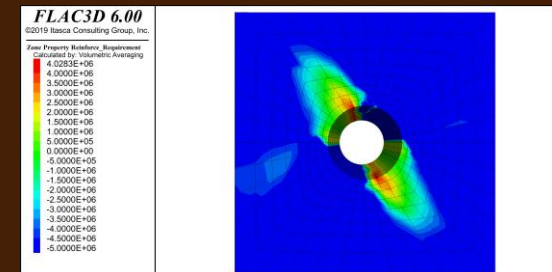
岩体弹性模量分布



稳定性系数分布



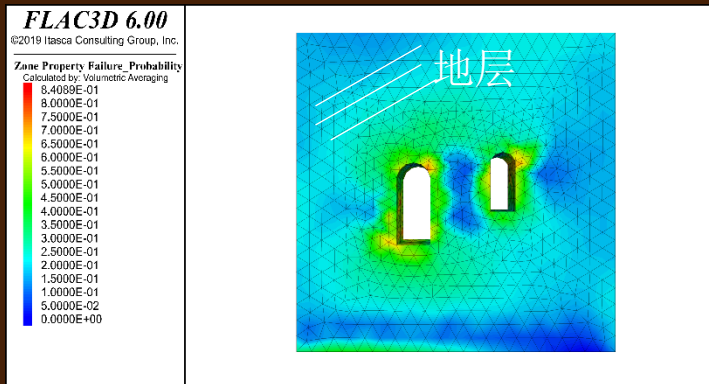
围岩破坏概率分布



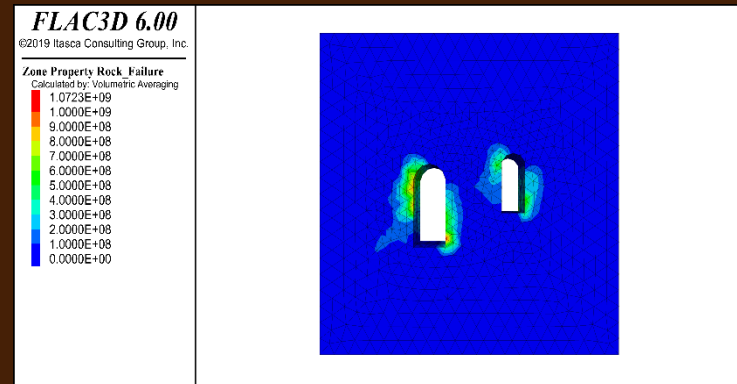
围岩加固需求度分布

- 锦屏一级水电站地下厂房

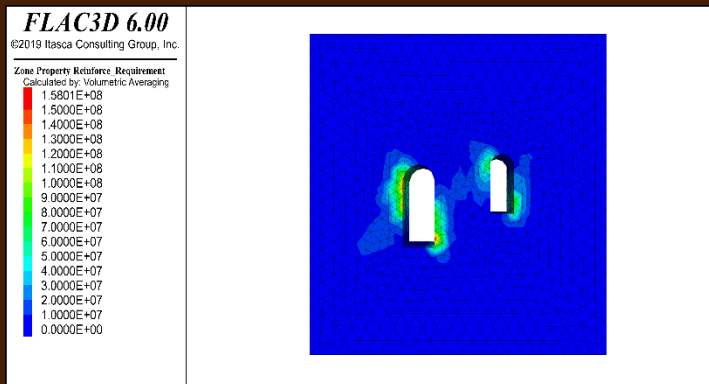
单斜大理岩，埋深200m，边坡倾斜应力边界条件



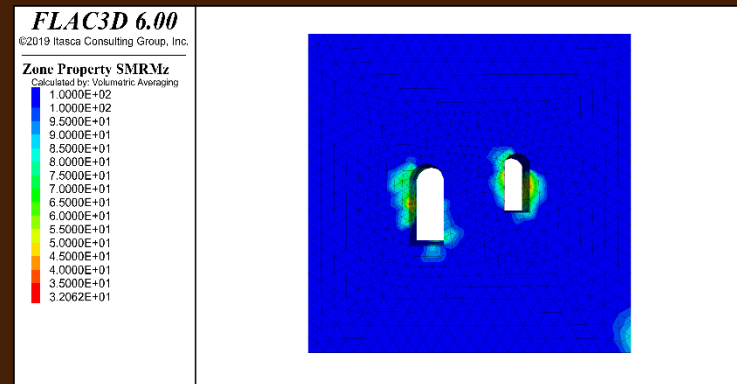
破坏概率分布



岩爆与破坏点分布



加固需求度分布



岩体质量等级分布

9) 节理岩体本构模型与拓展应用

- 本构模型与破坏概率

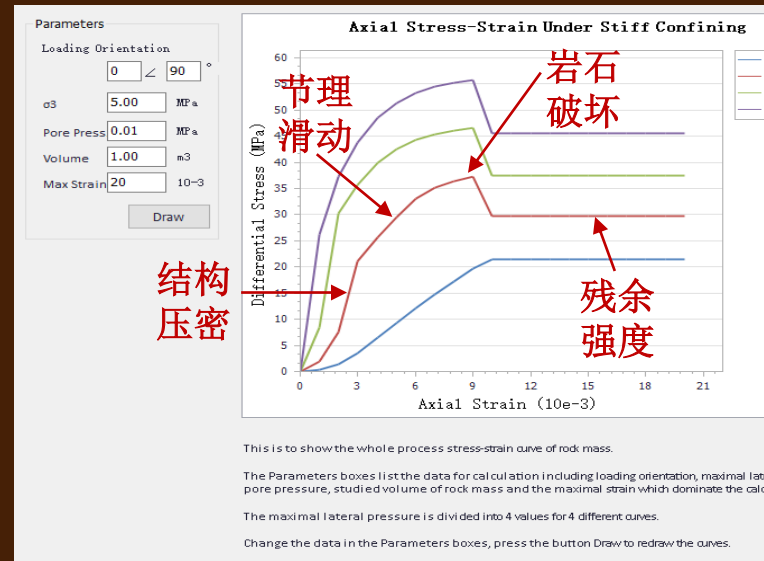
$$\left\{ \begin{array}{ll} e_{ij} = e_{0ij} + \frac{\alpha}{E} \sum_{p=1}^m \lambda \bar{a} (k^2 \sigma + \beta h^2 t) n_i n_j & \text{变形模型} \\ \sigma_{ij} = \min(T_p \sigma - R_p), \quad p = 0, 1, 2, \dots, m & \text{屈服准则} \end{array} \right.$$

$$P = 1 - e^{-kV\sigma_{cm}^m} \prod_{i=1}^N \left(1 - e^{-\frac{a_{ci}}{\bar{a}_i}} \right)^{\lambda_{vi}V} \quad \text{破坏概率}$$

- 岩体全过程变形解析模型

$$\left\{ \begin{array}{l} e_{11} = e_{011} + \frac{\alpha}{E} \sum_{p=1}^m \lambda \bar{a} (k^2 \sigma + \beta h^2 t) n_1^2 \\ \sigma_{11} = \min(T_i \sigma_{33} - R_i), i = 0, 1, 2 \dots m \end{array} \right.$$

岩体单元在加载方向
向上变形压力与强度
的协同行为

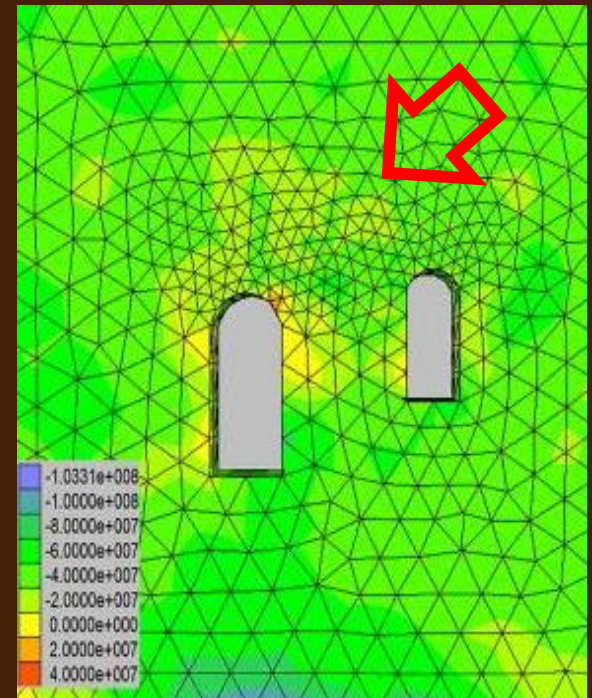
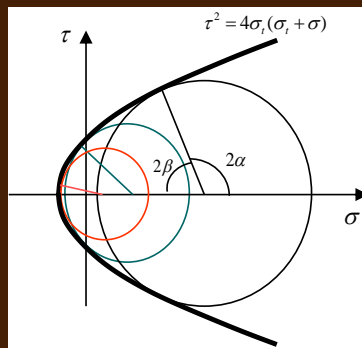


• 高地应力下岩爆机理

岩爆力学模型:

$$\begin{cases} e_{33} = e_{033} + \frac{\alpha}{E} \sum_{p=1}^m \lambda (\bar{a} k^2 \sigma + \beta h^2 t n_3^2) \\ (\sigma_1 - \sigma_3)^2 = \sigma_c (\sigma_1 + \sigma_3) \end{cases}$$

岩爆破裂角: $2\beta = \arccos \frac{\sigma_c}{2(\sigma_1 - \sigma_3)}$



潜在岩爆(应力余量)分布

岩体工程参数计算
云平台操作步骤演示

结 语：

- 工程岩体参数计算与岩体质量分级是岩体工程设计的基础，目前这类计算软件尚少。
- SMRM岩体参数计算方法—统计岩体力学理论为基础，并得到工程实践检验，效果良好。
- SMRM参数计算系统（SMRM Calculation）旨在倡导岩体参数的计算途径，是一个有意义的尝试。

谢谢大家！