



华东勘测设计研究院有限公司
HUADONG ENGINEERING CORPORATION

国内外大跨度地下工程岩石力学 咨询实践

褚卫江

2020 / 10

目录

01

背景介绍

02

白鹤滩地下工程

03

以色列Kokhav项目地下工程

04

展望



华东勘测设计研究院有限公司
HUADONG ENGINEERING CORPORATION

01 背景介绍

01 水电工程业绩 - 华东院典型水电工程



01 水电工程业绩 - 浙江新安江水电站

我国自行设计、自制设备
自主建设的第一座大型水电站

混凝土宽缝重力坝、坝高105m
厂房顶溢流泄洪布置

水库淹没形成大小岛屿1078座
形成美丽的“千岛湖风景区”



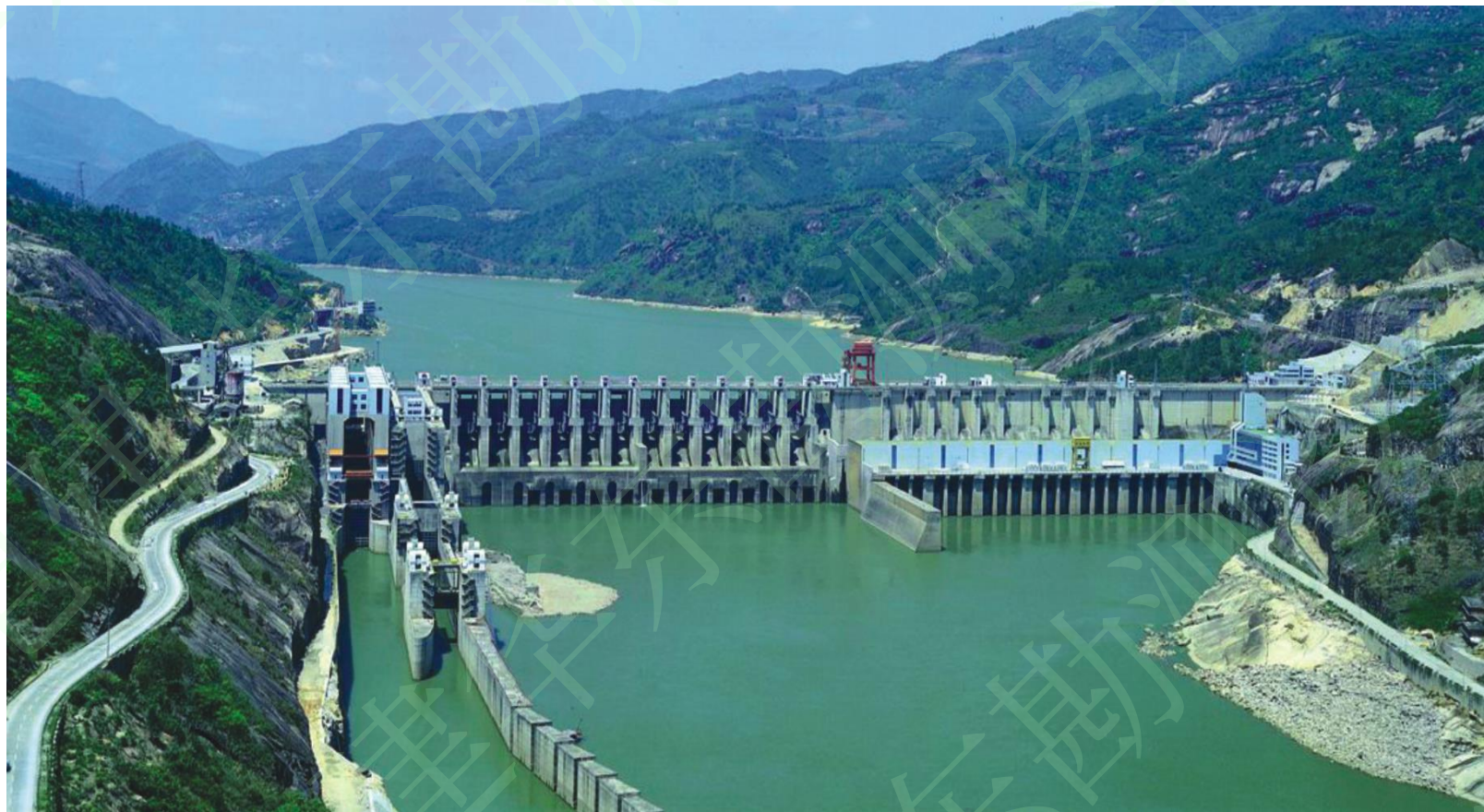
01 水电工程业绩 - 福建水口水电站

华东地区最大常规水电站
装机140万kW

混凝土重力坝
坝高129m

2×500吨级一线三级船闸
2×500吨级一线垂直升船机

荣获国家优秀工程设计、勘测双
金奖、国家科技进步二等奖



01 水电工程业绩 - 三心圆变厚双曲拱坝

紧水滩 - 三心圆双曲拱坝
坝高102m (1987年)

牛头山 - 抛物线型双曲拱坝
坝高108m (2005年)

周公宅 - 抛物线型双曲拱坝
坝高125.5m (2006年)

浙江紧水滩水电站



福建牛头山水电站



浙江周公宅水库



01 水电工程业绩 - 天荒坪抽水蓄能电站

总装机**180万千瓦**
已建成投产发电

中国**第一个**全库盆沥青
混凝土防渗抽蓄电站

中国**第一个**高水头混凝
土岔管抽蓄电站

**荣获全国优秀工程勘测
设计双金奖**



01 水电工程业绩 - 云南龙开口水电站

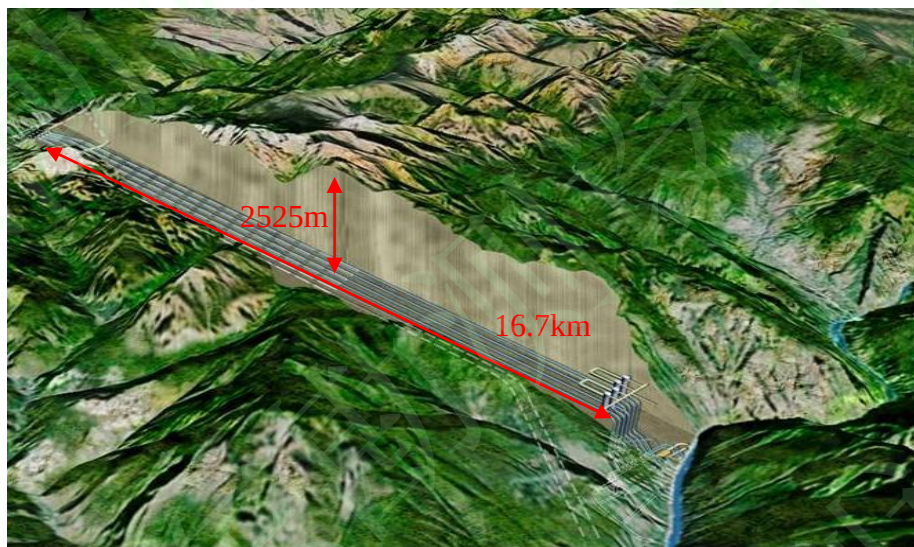
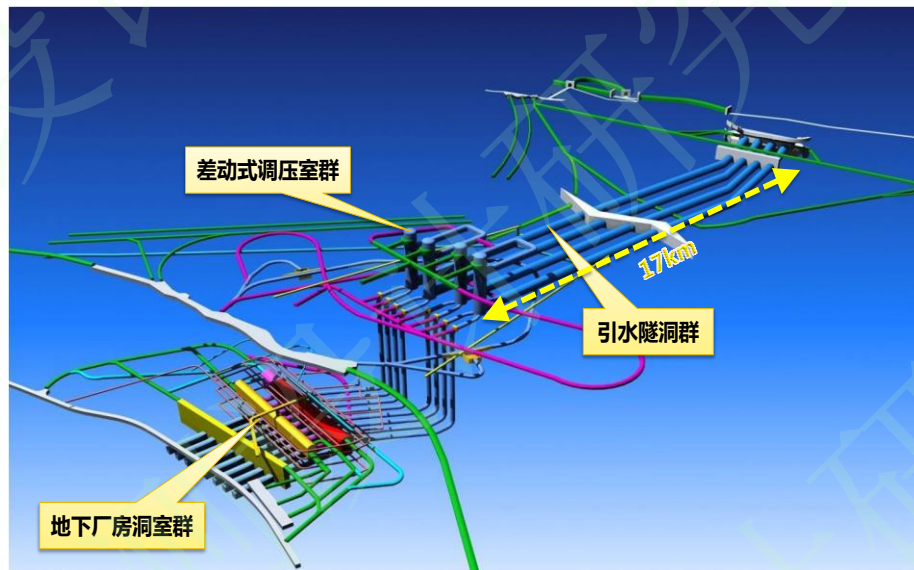
装机
180万kW

高烈度地震区、复杂地质条件下的
高碾压混凝土重力坝，坝高116m

荣获
国家优质工程金质奖、FIDIC工程奖



01 水电工程业绩 - 雅砻江锦屏二级水电站



4条引水隧洞，**单洞长16.7km**，洞径12.4~14.6m

超12km洞段埋深超1500m，最大埋深**2525m**

实测最大地应力113MPa、最高地下水压**1030m**

总长120km，总开挖量1300万m³

是近年来最大规模的超深埋水工隧洞群

01 水电工程业绩 - 柬埔寨王国桑河二级水电站

“柬埔寨三峡”
总装机**40万千瓦**

亚洲第一长坝
大坝全长**6.5km**

海外“**生态友好型**
电站”开发典范

中国技术+中国设备+
中国标准+中国管理

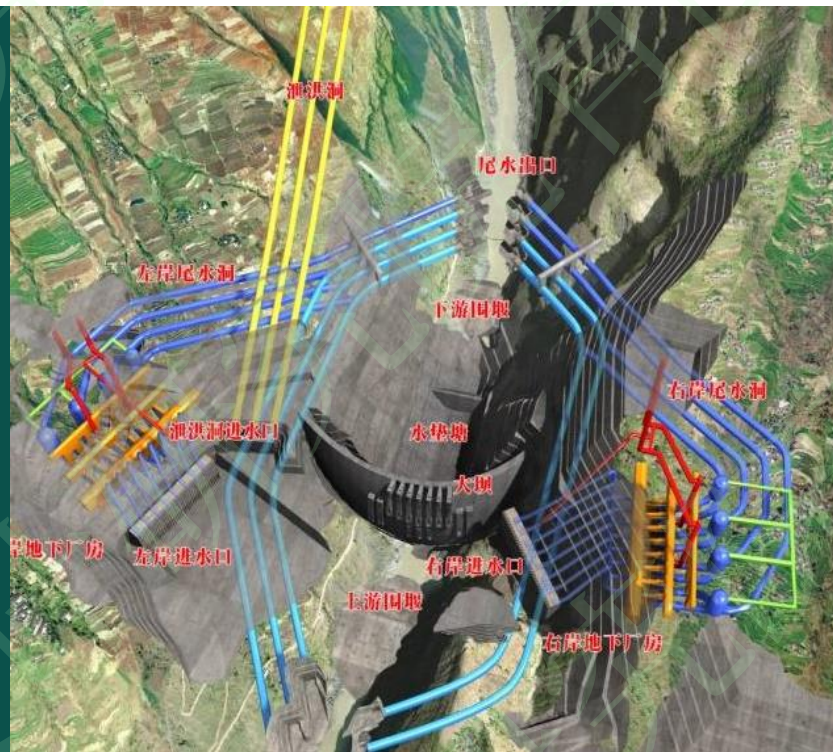
荣获电力行业优秀
工程设计**一等奖**



01 水电工程业绩 - 金沙江白鹤滩水电站



- 装机：1600万kW
- 单机：100万kW
- 坝高：289m
- 总水推力：1650万t
- 地下厂房：
438m×34m×89m
- 总开挖里程：217km
- 总开挖量：2500万m³



地下洞室规模

地下洞室群总规模**世界第一**
地下调压室直径**世界第一**
地下厂房跨度**世界第一**

装机及泄洪消能规模

单机容量**世界第一**
总装机容量**世界第二**
反拱水垫塘规模居**世界第一**

拱坝规模

拱坝坝高世界第三、总水推力世界第二
首次300m高坝全坝采用低热水泥混凝土
设计地震动参数位居300m级高拱坝全国第一

01 水电工程业绩 - 水电数字化智慧化管理系统

“一个平台、一个模型、一个数据架构” 理念

三维协同设计平台

设计施工一体化平台

全生命周期管理平台

工程数字化标准管理体系

三维测绘地理信息系统 MapStation
地质三维勘察设计系统 GeoStation
枢纽三维协同设计系统 Civil Designer
工厂三维协同设计系统 Plant Designer
混凝土配筋三维设计系统 ReStation
电气三维设计系统 Electrical Designer
参数化机电设备及元件库 Digital Elements
元件库管理工具 ABD Device Manager
三维模型算量系统 QTM

三维校审系统 Synergy
工程数据管理系统 MDM

综合展示
设计管理
质量管理
进度管理
灌浆智能化监控
安全监测信息查询
施工视频监控
水情测报信息查询
混凝土智能温控信息查询
基础数据管理
系统管理
.....

大坝安全监察平台
集团(流域)级群坝安全管理监督平台
国家水电站（大坝）安全和应急管理平台
电站三维全景信息系统
三维数字化档案管理系统
三维机组状态监测系统
设备三维虚拟检修培训系统
水工建筑物三维巡检管理系统
基础数据管理
系统管理
.....

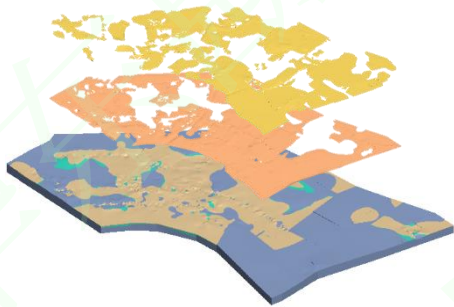
水电工程数字化咨询服务

01 水电工程业绩 - 水电工程三维协同设计产品

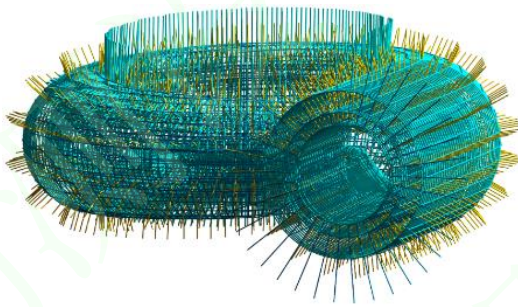
logo	产品名称		logo	产品名称	
	HydroStation	水电三维数字化设计平台		Civil Designer	枢纽三维协同设计系统
	MapStation	三维测绘地理信息系统		Plant Designer	工厂三维协同设计系统
	GeoStation	地质三维勘察设计系统		Electrical Designer	电气三维设计系统
	ReStation	混凝土配筋三维设计系统		Digital Elements	参数化机电设备及元件库
	QTM	三维模型算量系统		PW Synergy	三维数字化设校审系统



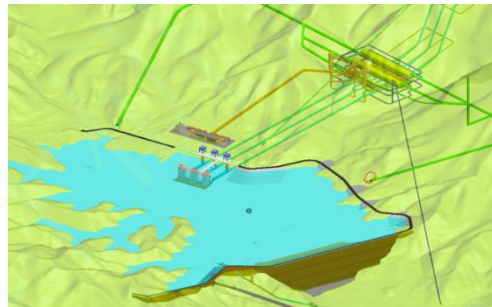
三维测绘地理信息系统应用：
某移民点航拍影像



地质三维勘察设计系统应用：
某工程地质三维模型



混凝土配筋三维设计系统应用：
某水电站蜗壳三维配筋



枢纽三维协同设计系统应用：
某抽水蓄能电站枢纽三维模型

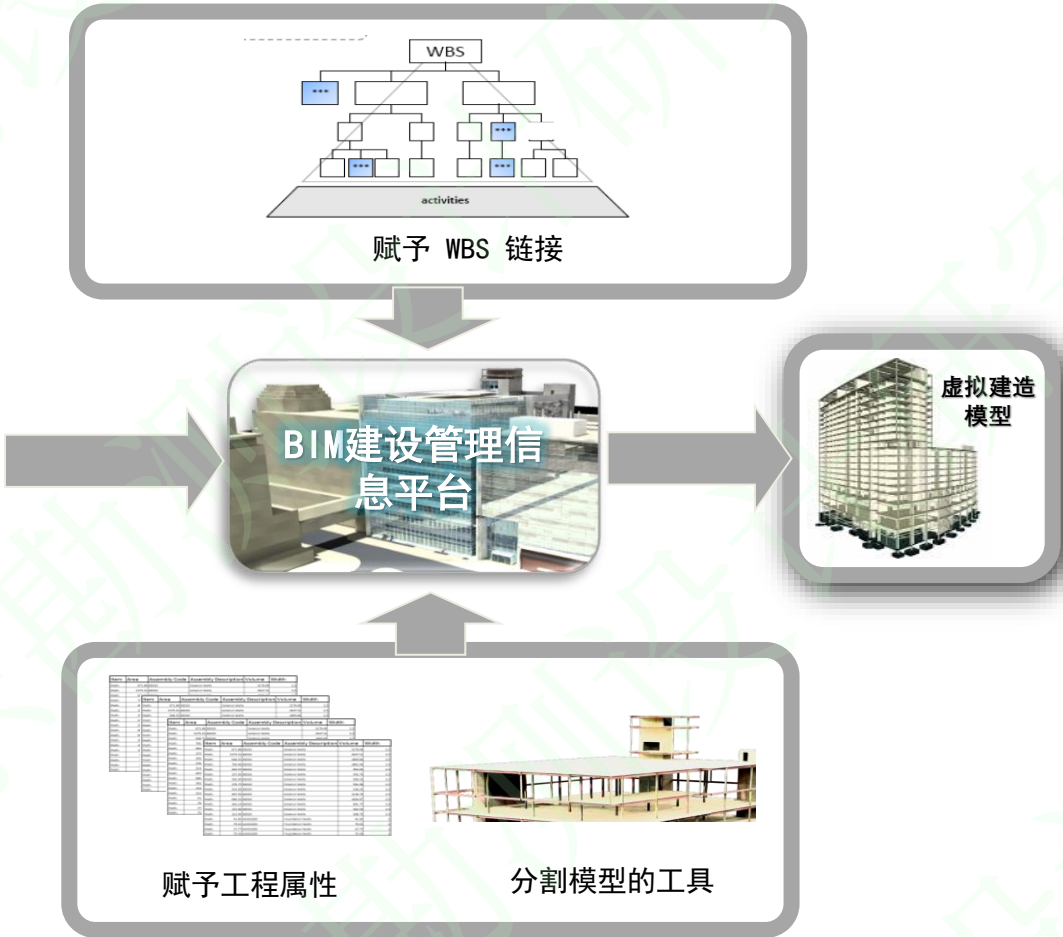
01 水电工程业绩 - 水电工程设计施工一体化管理平台

“一个模型、一个平台、一个数据架构”

设计和规划的2D & 3D模型



BIM模型



数据装载

- 基础平台
- 设计管理
- 工程技术管理
- 工程进度管理
- 工程质量管理
- 工程投资管理
- 工程安全管理
- 施工标准化管理
- 工程安全监测
- 物资管理
- 智能碾压管理
- 智能灌浆管理
- 智慧工地管理
- 智能温控管理

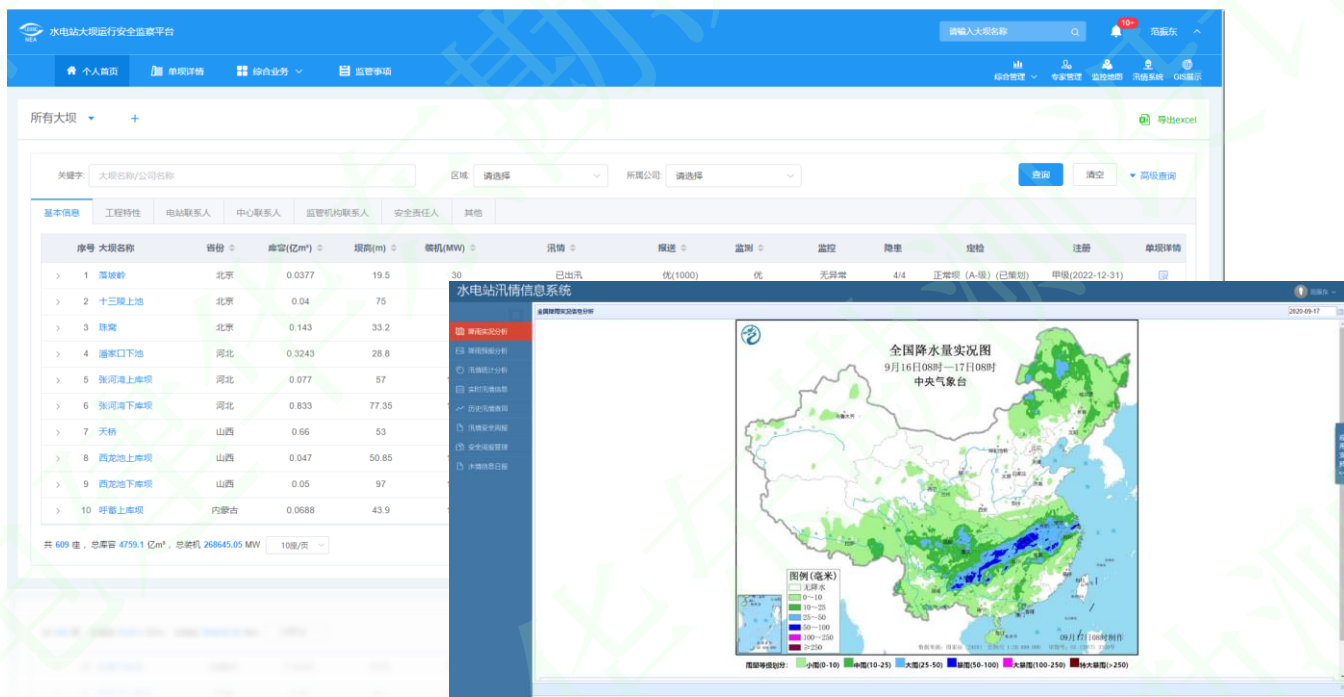
工程管理系统

横向到边，纵向到底

数据消费

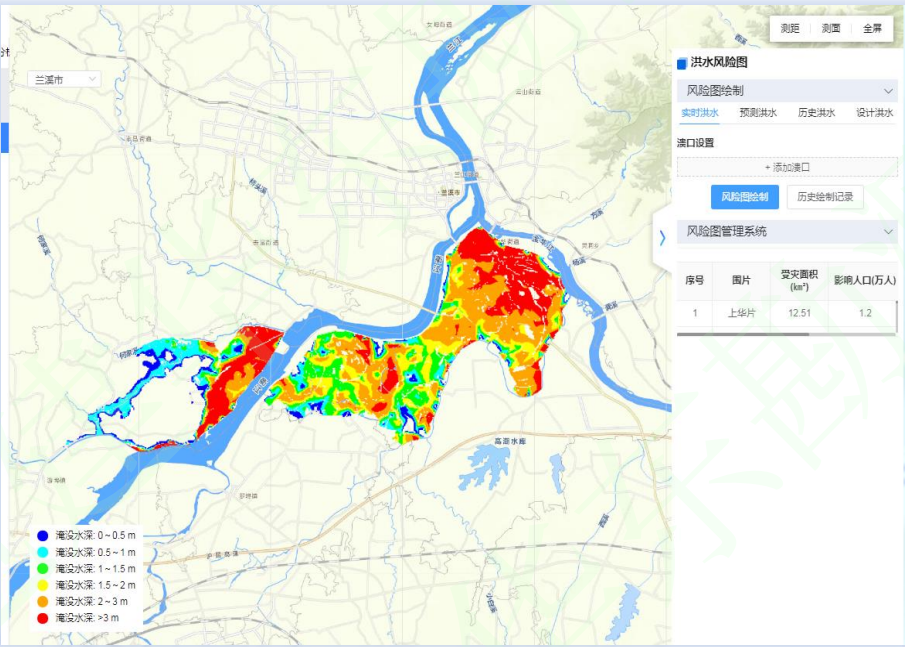
01 水电工程业绩 - 国家能源局大坝安全监察平台

是政府、能源局大坝中心、发电企业统一管理大坝安全的工作平台，实现了监管部门对国内电力行业5万装机以上600多座大坝的安全监督与管理。平台已覆盖电力行业监管大坝安全的各项业务，通过对大坝安全日常监测数据和业务数据的集成集中管理，**及时掌握大坝运行安全状况和监督大坝安全管理工作情况。**



01 水电工程业绩 - 水电站（大坝）安全和应急管理平台

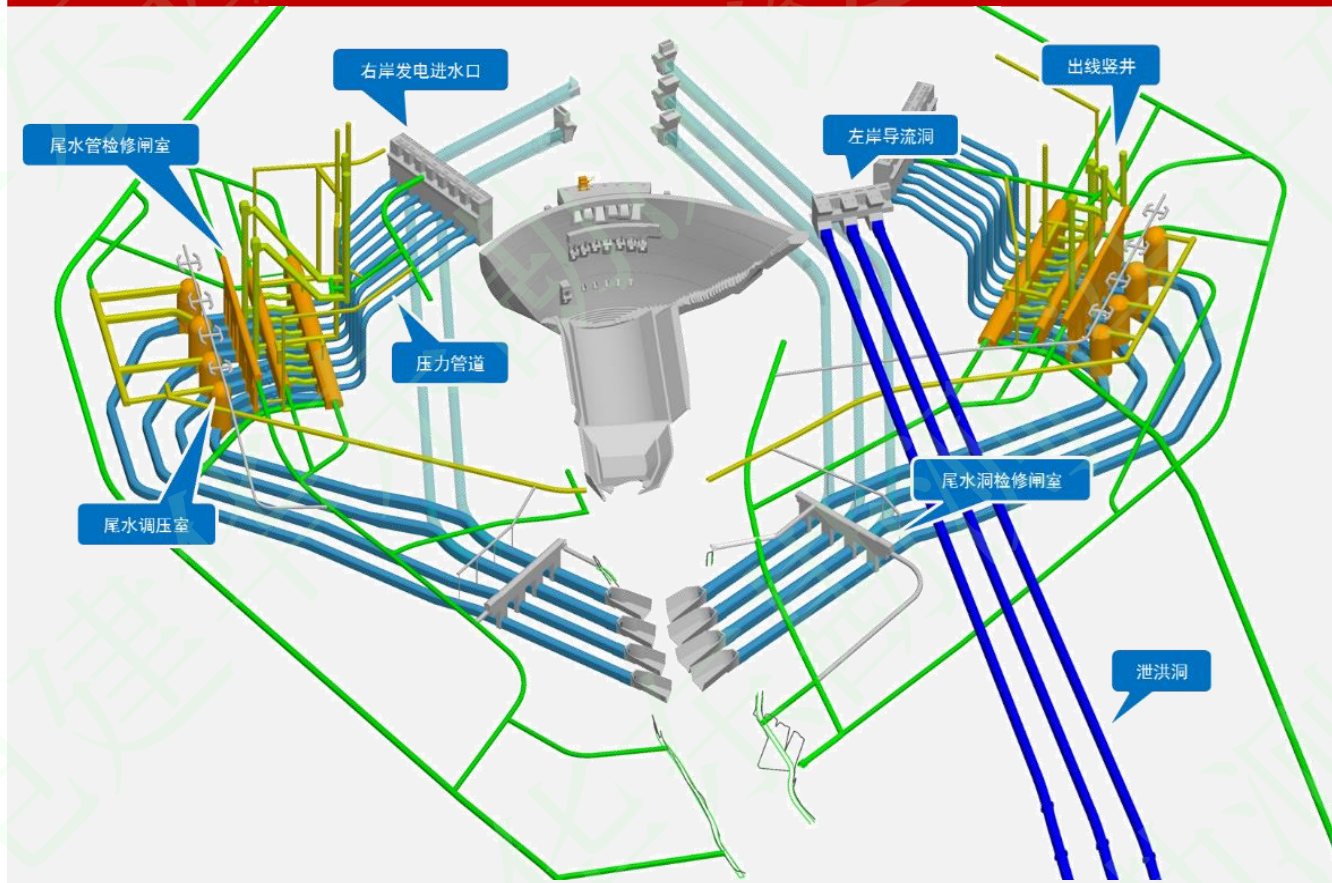
是为政府有关部门、电力企业提供大坝安全风险管控和应急管理工作平台。平台梳理了**全国55条干流、343条支流和1069座大坝的基础数据**，接入**台风、地震、降雨、水位等多类型实时数据**，集成数据并结合**二三维一体化**技术快速展示，全方位监控大坝安全风险，实现了**大坝安全应急全业务链**数字化智慧化管理。



02 白鹤滩地下工程

02 白鹤滩地下工程

白鹤滩水电站（装机1600万kW）



关键技术指标

- ✓ 【柱状节理作为坝基】
- ✓ 【拱坝坝高289m】
- ✓ 【总水推力1650万t】
- ✓ 【单机容量1000MW】
- ✓ 【300m级高坝抗震参数】
- ✓ 【300m级高坝低热砼】
- ✓ 【地下厂房跨度34m】
- ✓ 【地下洞室群总规模2500万m³】
- ✓ 【地下洞室群总长度217km】

在建第一大水电站

02 白鹤滩地下工程 - 基本地质条件



不对称“V”形峡谷，正常蓄水位处河谷宽449~534m

左岸：缓坡与陡壁相间出现的台阶状地形，坡度45°

右岸主要为陡壁地形，坡度约60°



左岸开挖高程965~556m，坡高400米

右岸开挖高程1200~556m，坡高650米

02 白鹤滩地下工程 - 基本地质条件

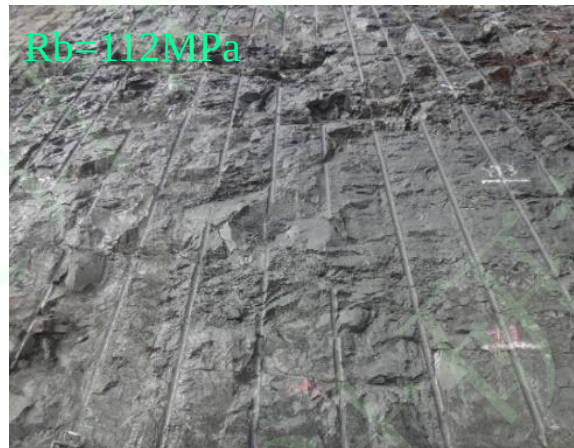
峨眉山组 ($P_2\beta$) 玄武岩主要岩性：块状玄武岩、角砾熔岩、柱状节理玄武岩及少量凝灰岩



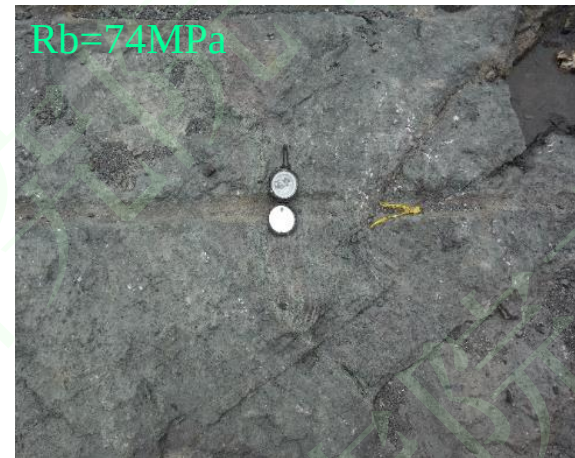
杏仁状玄武岩(大坝建基面)



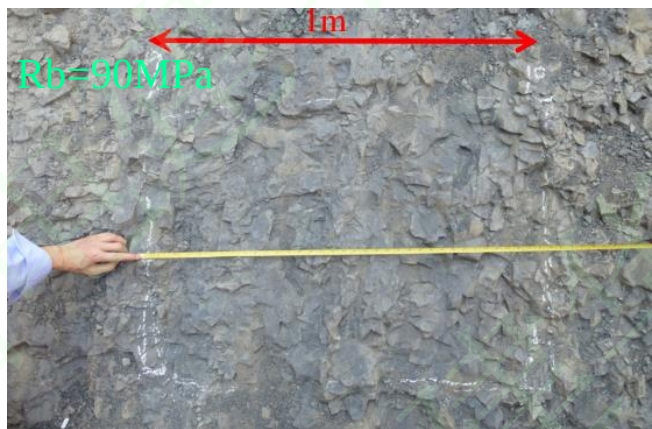
斜斑玄武岩(二道坝)



隐晶质玄武岩(左岸坝基)



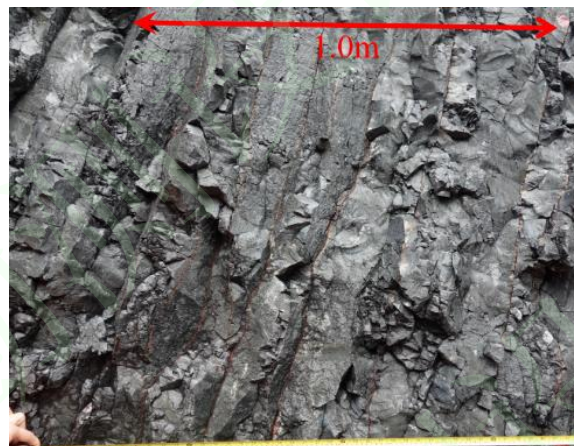
角砾熔岩(河床坝基)



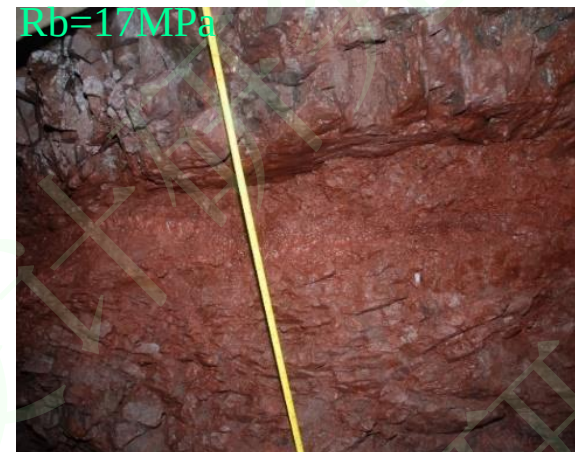
第一类柱状节理玄武岩(左岸坝基)



第一类柱状节理玄武岩(河床)



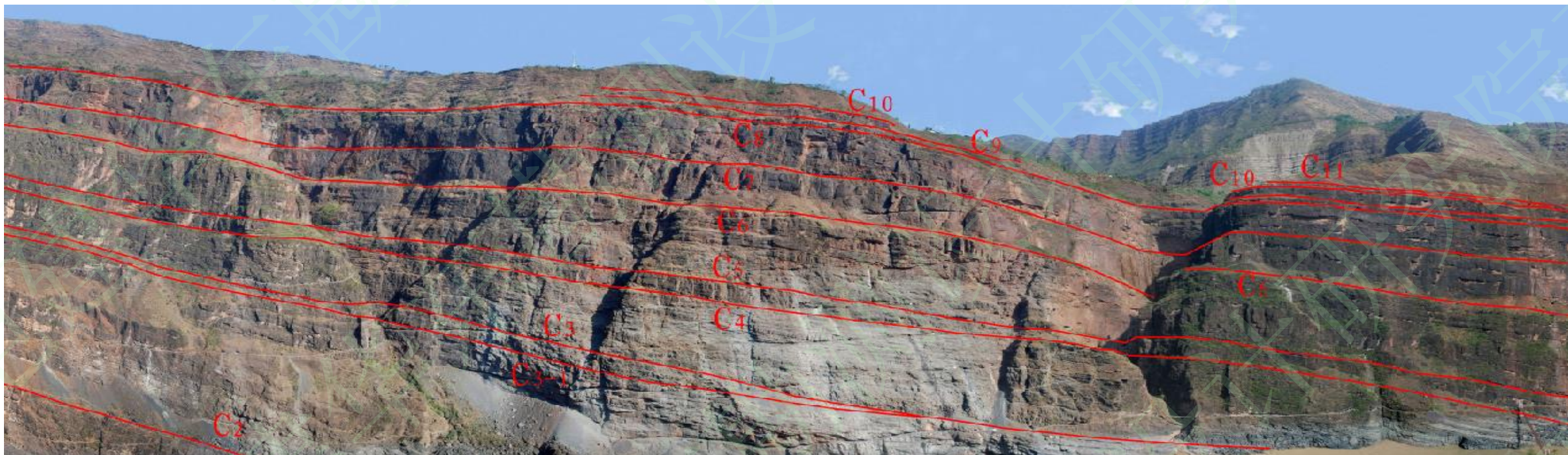
第一类柱状节理玄武岩(右岸坝基)



凝灰岩

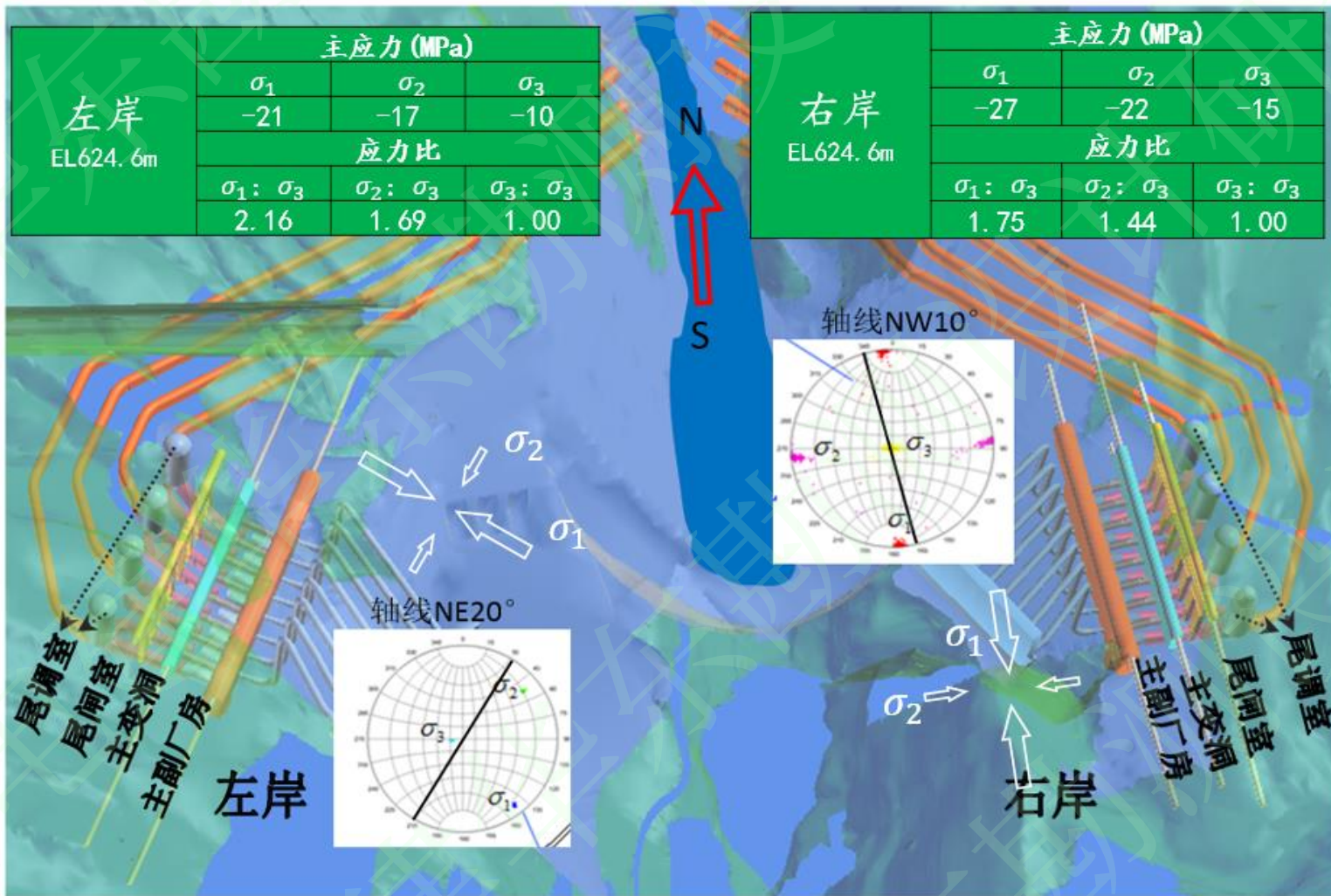
02 白鹤滩地下工程 - 基本地质条件

- 坝址发育11条层间错动带，延伸数十公里
- 玄武岩岩流层顶部软弱凝灰岩在构造运动过程中发生破碎、错动，形成破碎夹层，在地下水及风化下软弱泥化



层间错动带

02 白鹤滩地下工程 - 基本地质条件



左岸厂区

- 左岸厂房埋深260~330m
- σ_1 方位N30~50°W, 倾角5~13°
- σ_1 值19~23MPa(最大值33.39MPa)
- 岩强比: 3.2~5.9

右岸厂区

- 右岸厂房埋深420~450m
- 方位N0~20°E, 倾角2~11°
- σ_1 值22~26MPa(最大值30.99MPa)
- 岩强比: 2.8~5.1

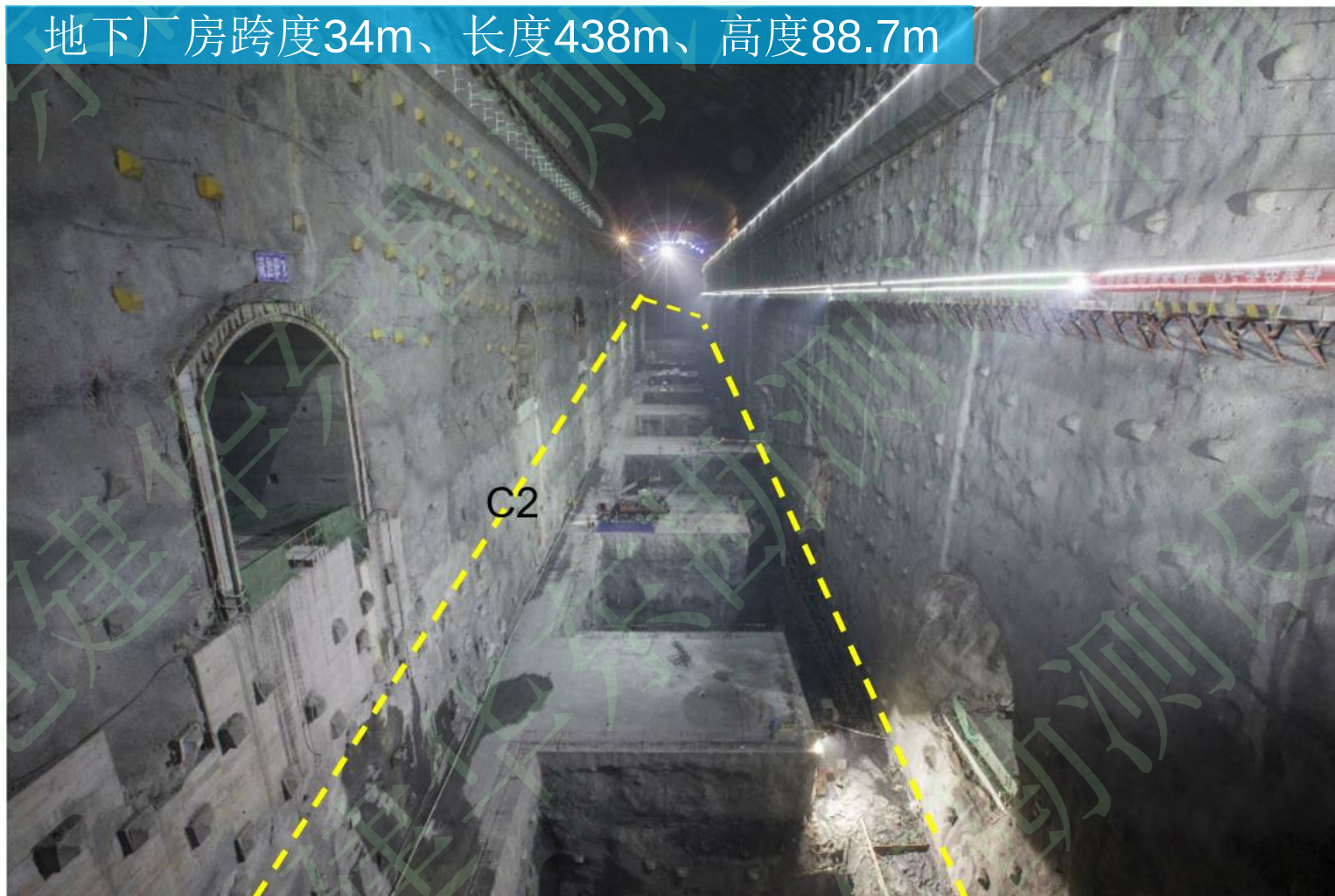
地应力

水平总体较高, 且存在河谷和构造影响的局部地应力场特征

02 白鹤滩地下工程 - 洞室规模

地下洞室群总长**217km**，四大洞室开挖边界空间范围内挖空率高达**37%**

地下厂房跨度34m、长度438m、高度88.7m



地下厂房形象



02 白鹤滩地下工程 - 洞室规模

尾调室直径达48m、最大高度128m



顶拱受层间带+柱状节理影响

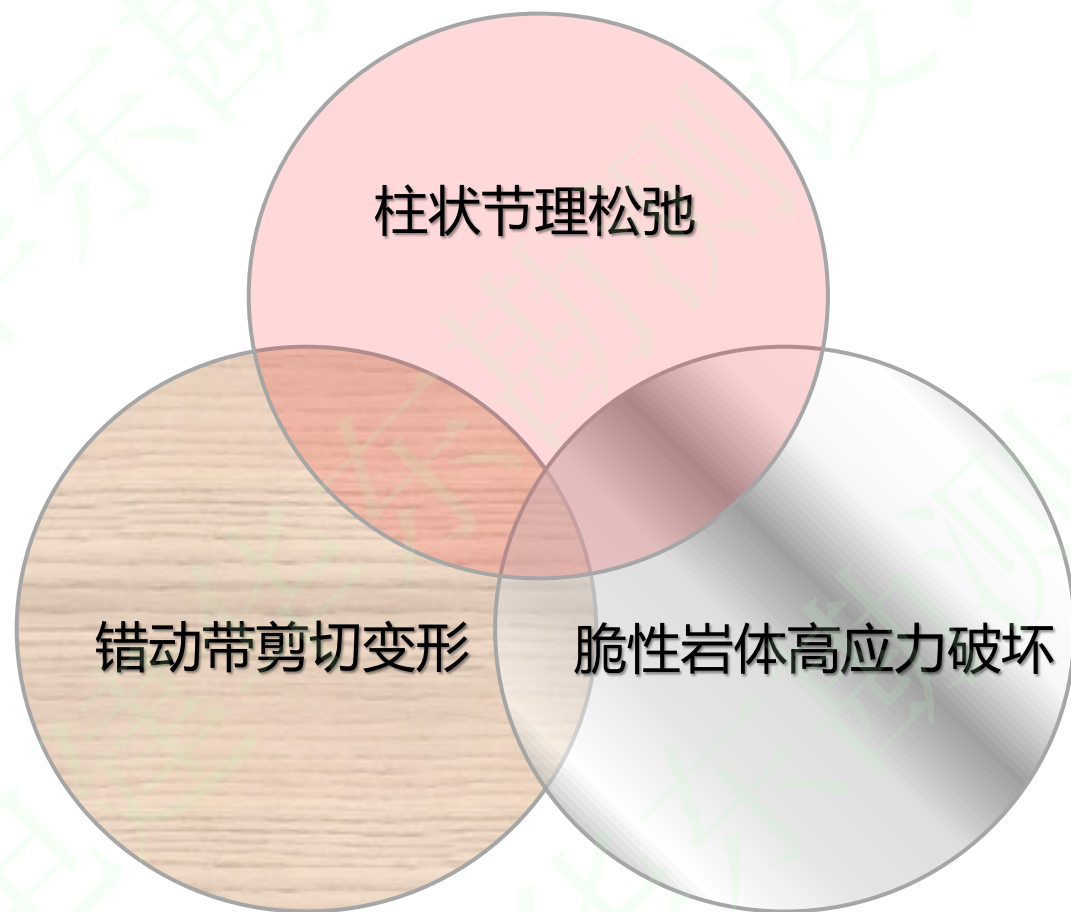


边墙受柱状节理松弛影响

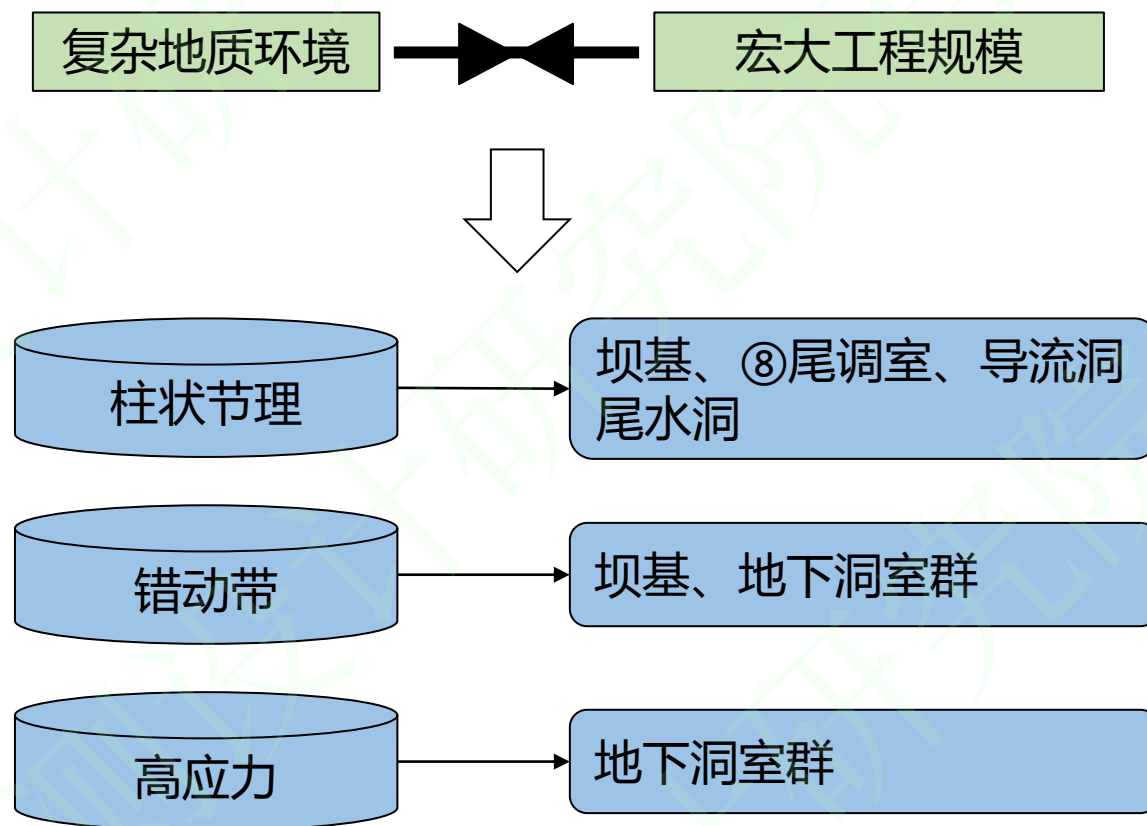


02 白鹤滩地下工程

- 主要岩石力学问题



三类主要岩石力学问题



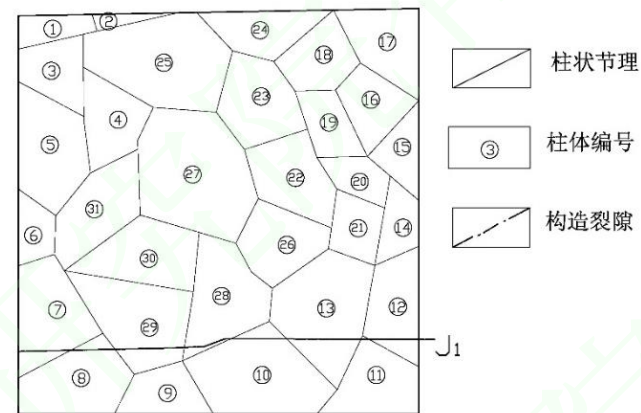
主要影响部位

02 白鹤滩地下工程 - (1) 柱状节理及尾水调压室

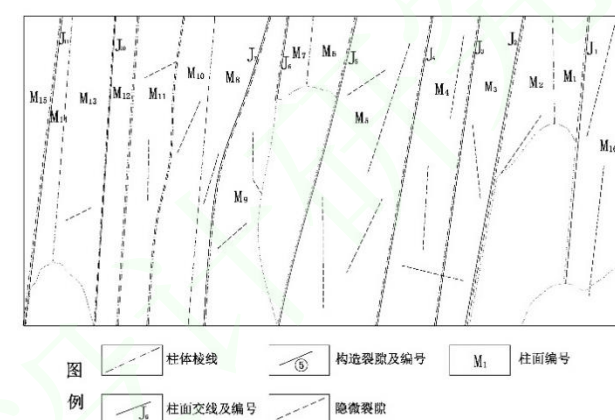
各向异性几何特征：精细地质素描



柱体倾角 75° 左右



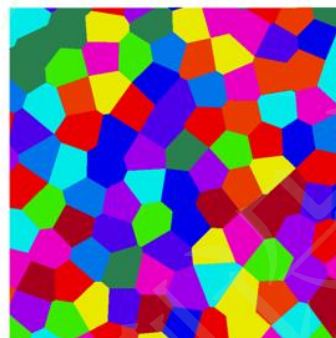
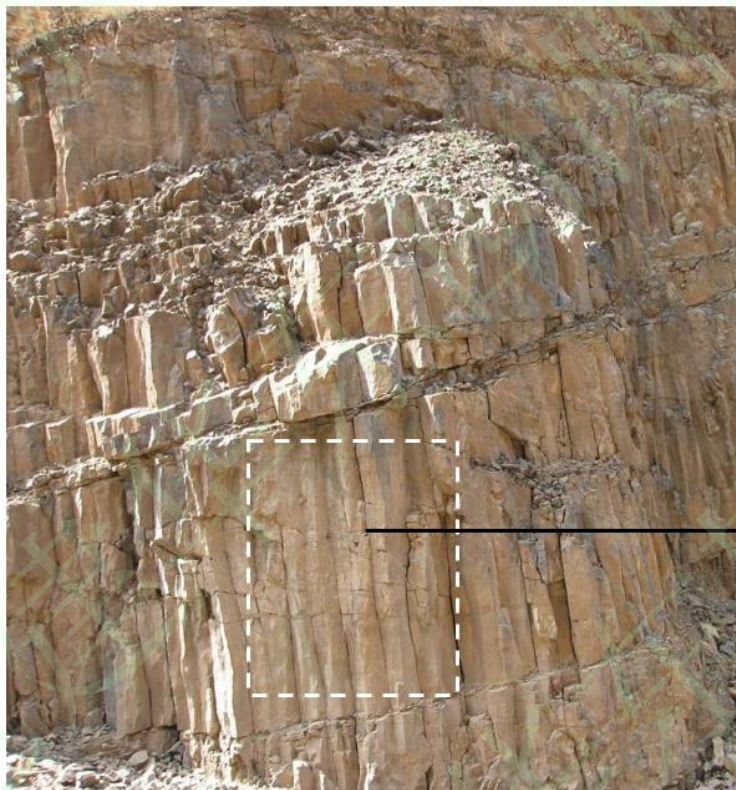
柱体直径13~25cm，为不规则多边形



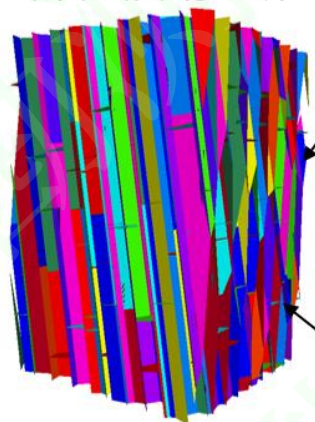
柱体长度一般为2~3m，节理间距纵横比达10倍

02 白鹤滩地下工程 - (1) 柱状节理及尾水调压室

各向异性几何特征：概化模型

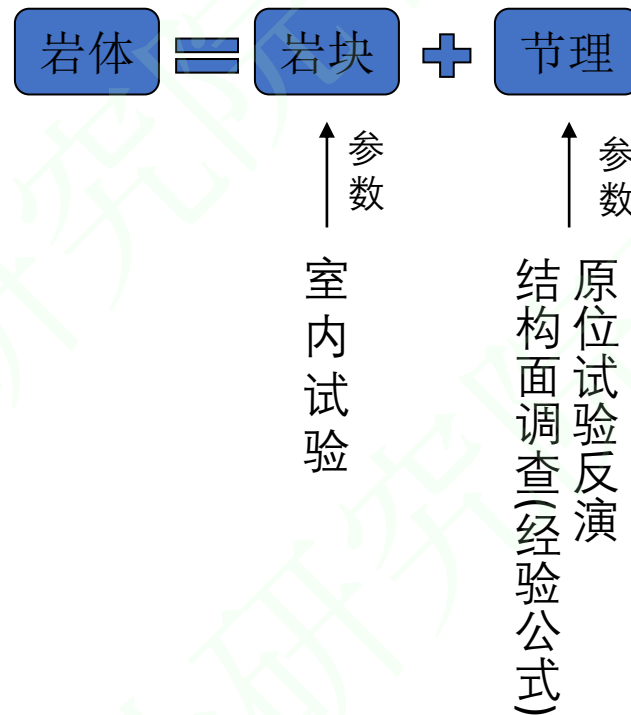
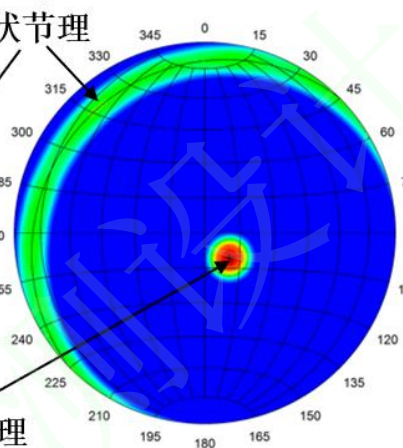


断面不规则多边形



柱状节理

横节理

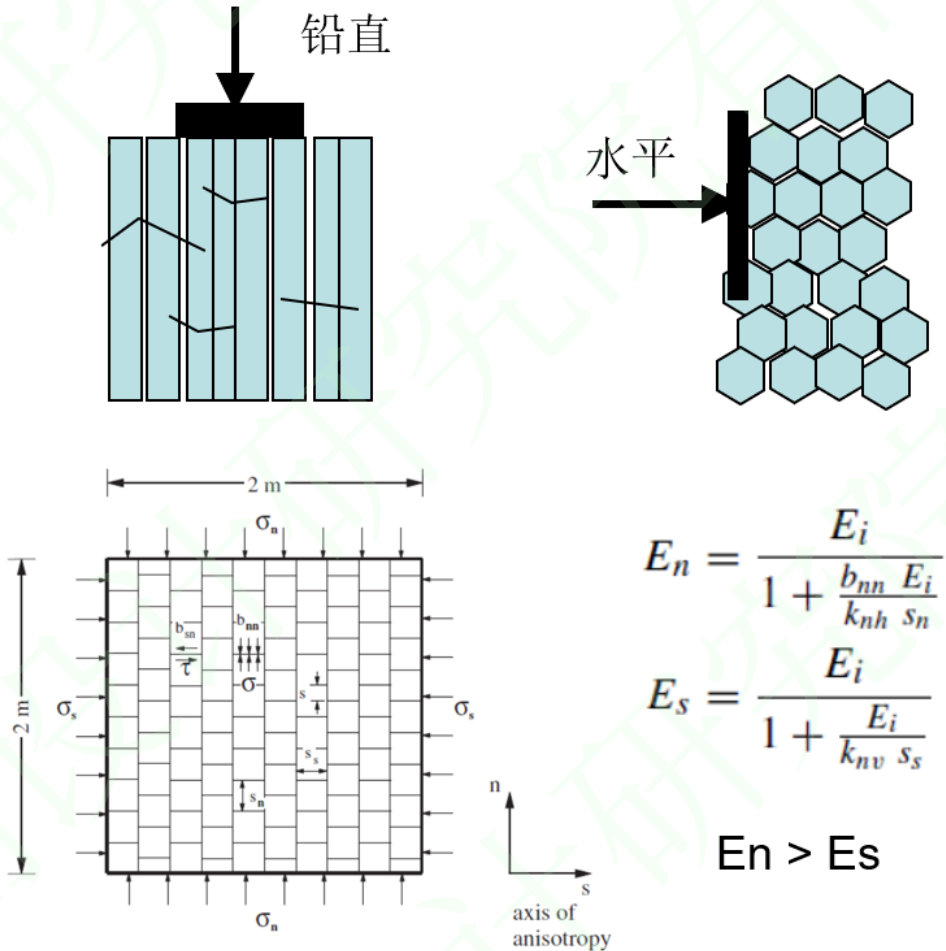


采用三维离散元方法可以直接模拟复杂的柱状节理岩体结构。

02 白鹤滩地下工程 - (1) 柱状节理及尾水调压室

各向异性力学特性：试验结果

岩体类别	荷载方向	试点数量 (点)	变形模量平 均值 (GPa)	
II ₂	水平	3	26.18	0.46
	铅直	3	11.95	
III ₁	水平	16	16.11	0.60
	铅直	23	9.69	
III ₂	水平	10	13.23	0.57
	铅直	13	7.52	
IV ₂	水平	3	4.08	0.87
	铅直	4	3.41	



铅直向模量<<水平向 ?

理论上：铅直向模量>水平

02 白鹤滩地下工程 - (1) 柱状节理及尾水调压室

试验揭示各向异性的原因

原因1：柱状节理发育

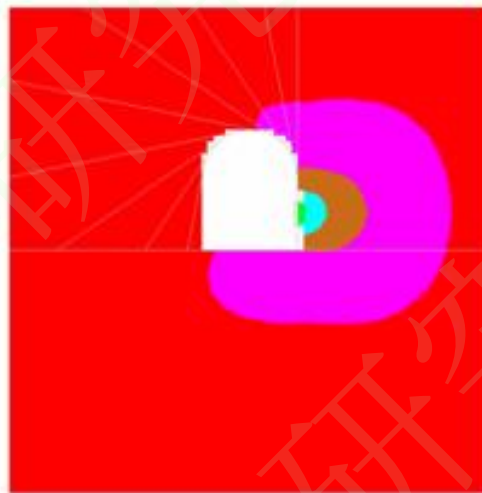
刚性承压板的Boussinesq计算公式适用于均质、连续、各向同性岩体：

$$E = \frac{\pi}{4} \bullet \frac{(1 - \mu^2) p D}{W}$$

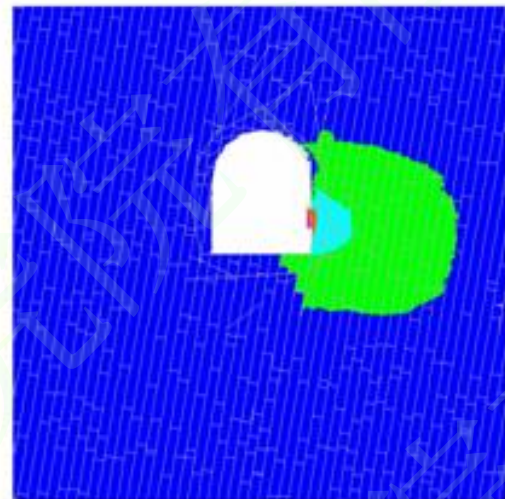
柱状节理发育导致刚性承压板在铅直向加载的“变形泡”显著区别于均匀、连续、各向同性岩体。

受压柱体与周围柱体间节理产生了明显错动变形，这是导致计算的铅直向模量较低的主要原因。

水平向加载

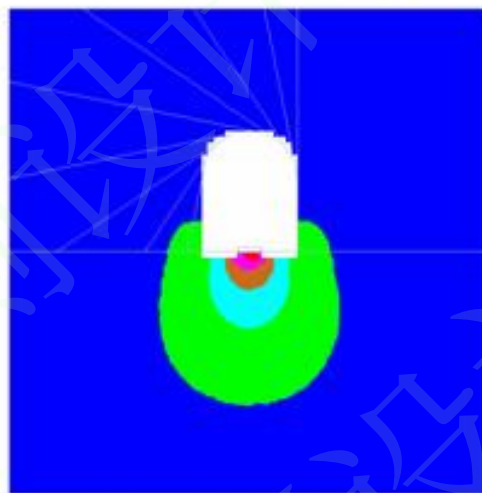


各向同性岩体



柱状节理岩体

铅直向加载



各向同性岩体

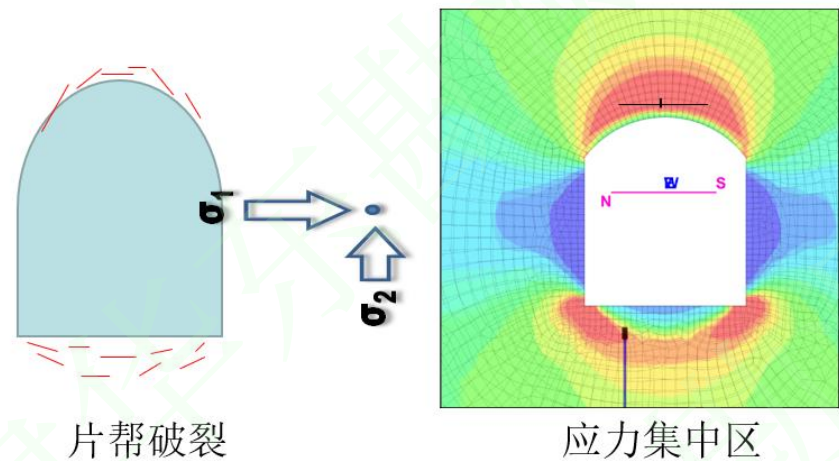


柱状节理岩体

02 白鹤滩地下工程 - (1) 柱状节理及尾水调压室

试验揭示各向异性的原因

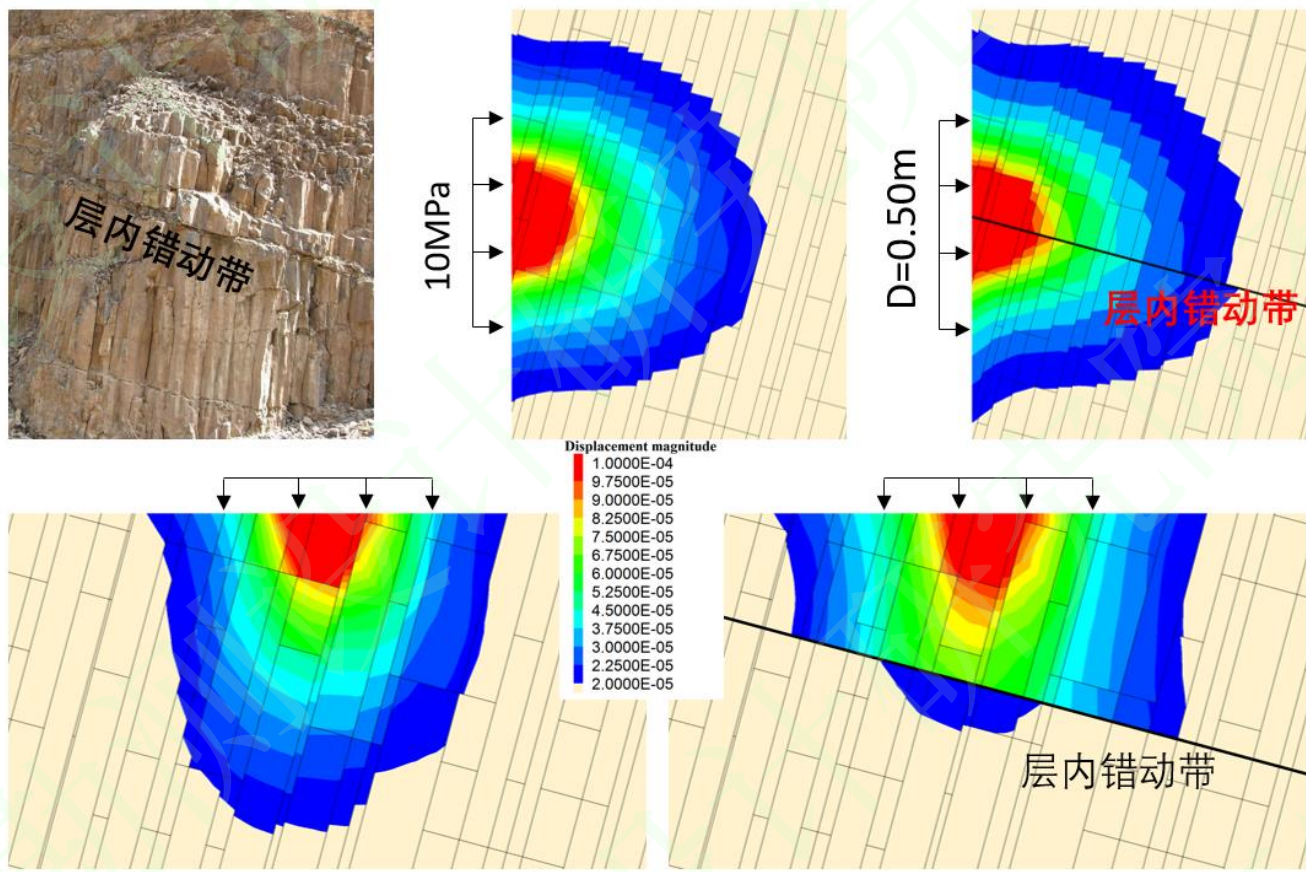
原因2：高地应力



位置	PD119-1			E1-11	
	松弛	松弛	未松弛	松弛	深挖30cm
水平	7.44	6.41	9.46	9.69	13.54
铅直	5.58	4.77	15.11	9.09	38.11

坝基补充测试证明，非松弛柱状节理岩体铅直向模量>水平向模量

原因3：结构面组合

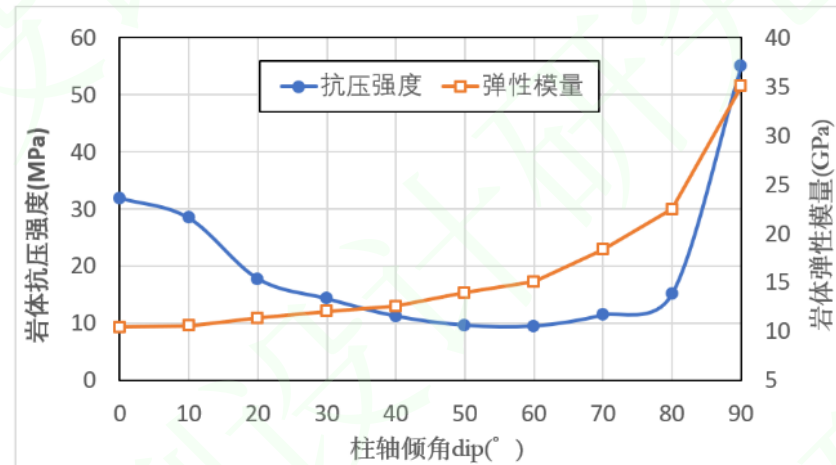
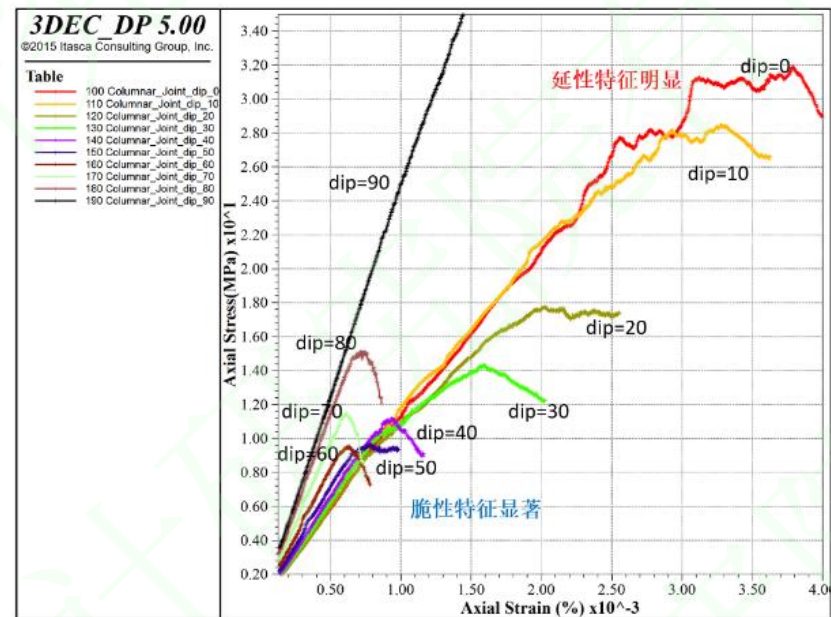
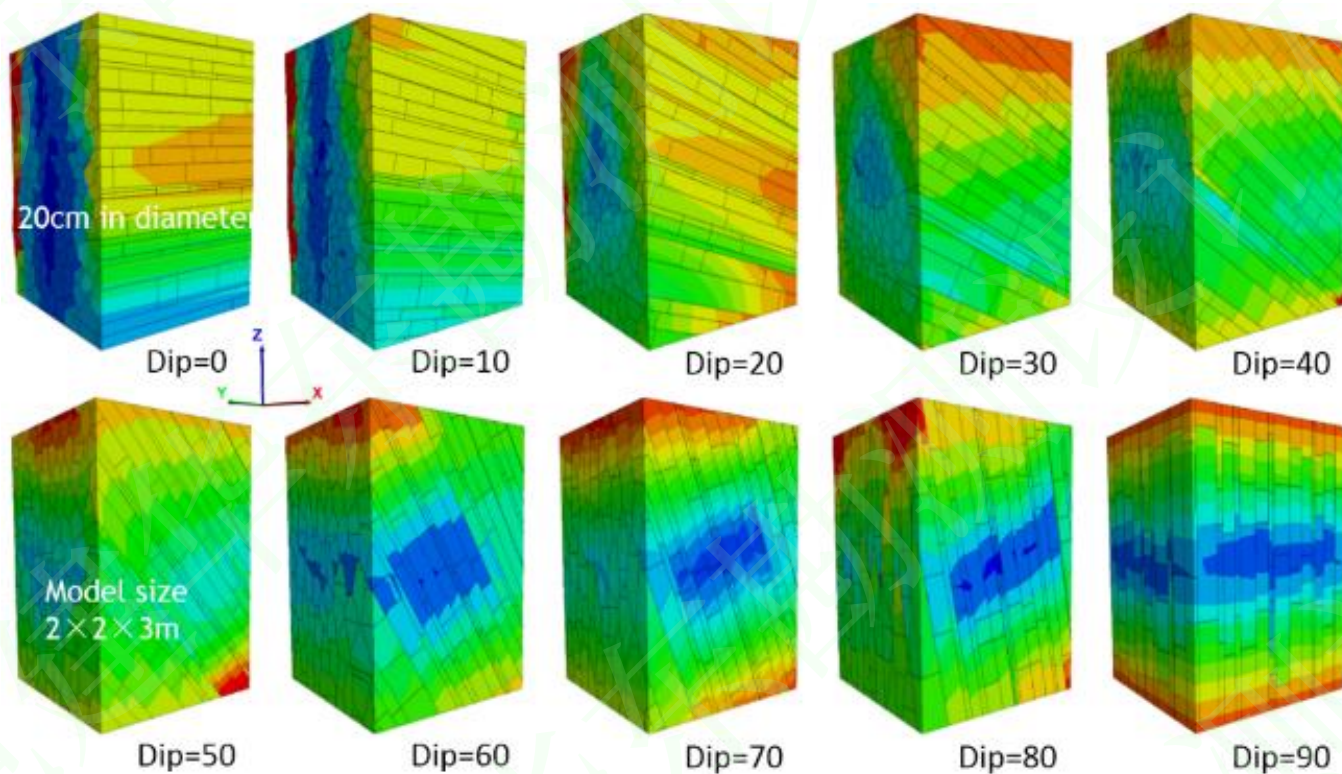


缓倾构造对铅直向模量影响明显

02 白鹤滩地下工程

- (1) 柱状节理及尾水调压室

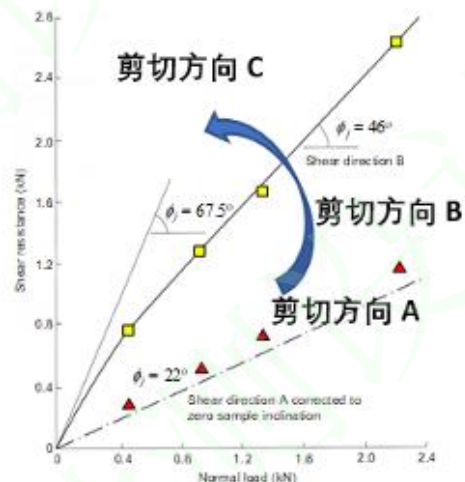
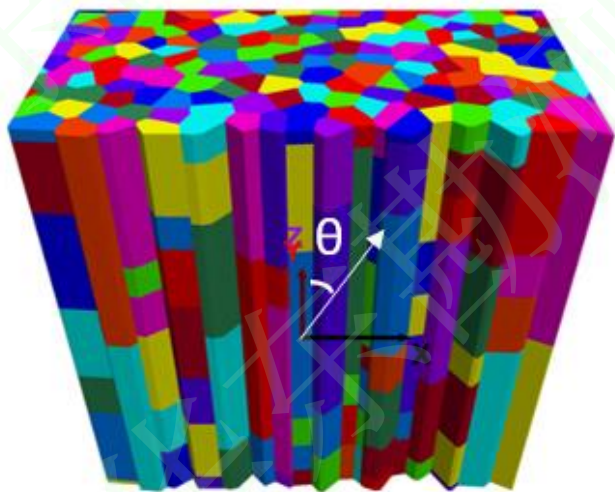
各向异性力学特性：变形和强度



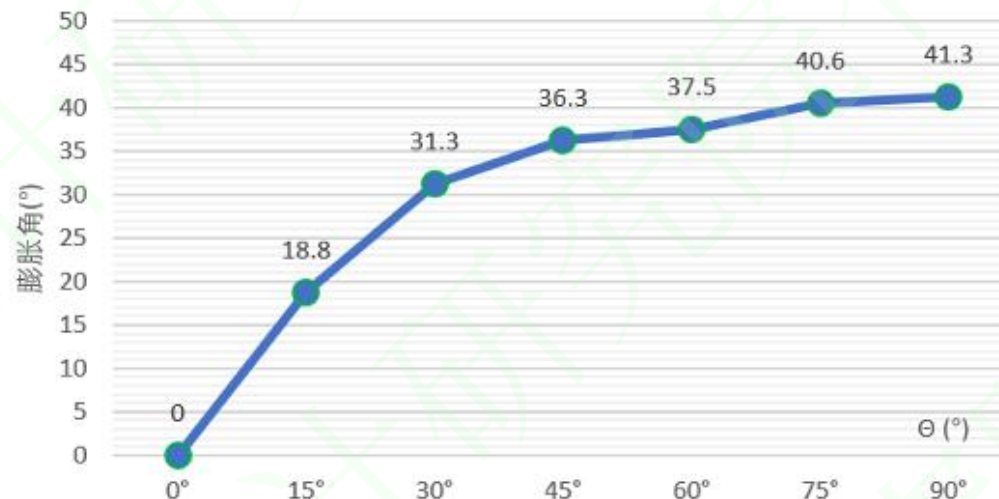
柱状节理岩体**变形**和**强度**各向异性特征显著，
需要同时考虑！

02 白鹤滩地下工程 - (1) 柱状节理及尾水调压室

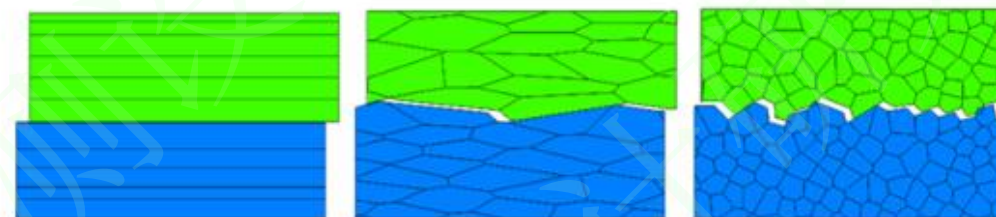
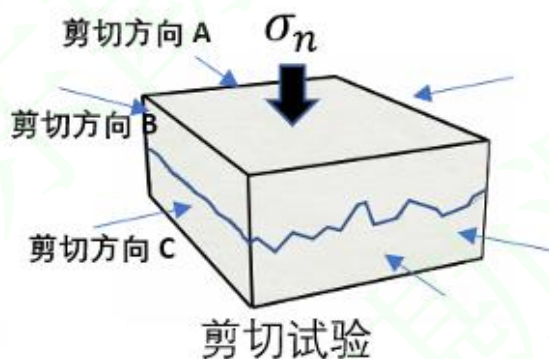
各向异性力学特性：剪胀角



各向异性剪切试验成果



数值试验揭示的各向异性剪胀特性



剪切方向 A
($\theta=0^\circ$)

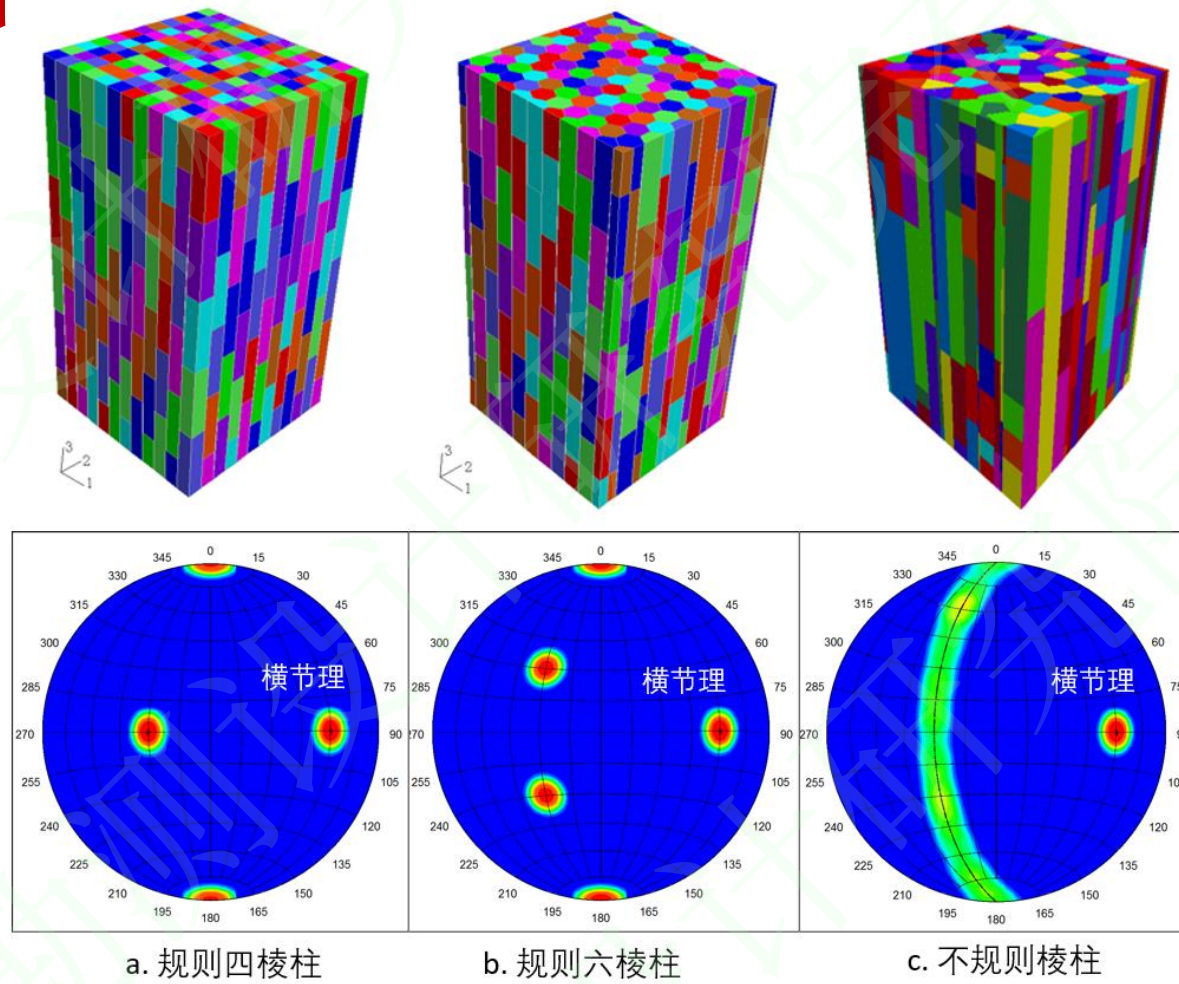
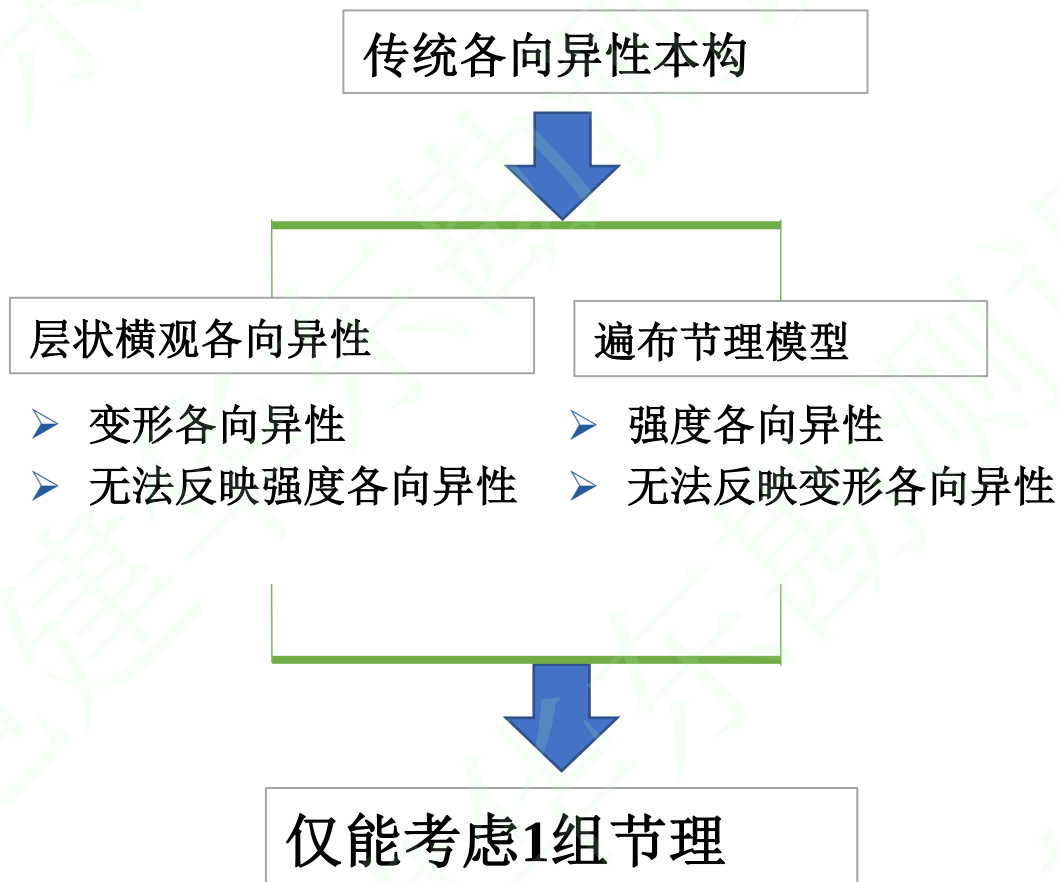
剪切方向 B
($\theta=15^\circ \sim 75^\circ$)

剪切方向 C
($\theta=90^\circ$)

各向异性的剪胀角影响峰值和峰后强度特征，也需要同时考虑！

02 白鹤滩地下工程 - (1) 柱状节理及尾水调压室

各向异性本构模型：功能设计



柱状节理岩体需要考虑3~4组节理

- (1) 柱状节理及尾水调压室

$$\varepsilon_i = S_{ij} \sigma_j \quad i, j=1,2,\dots,6$$

各向异性弹性模量

规则四棱柱

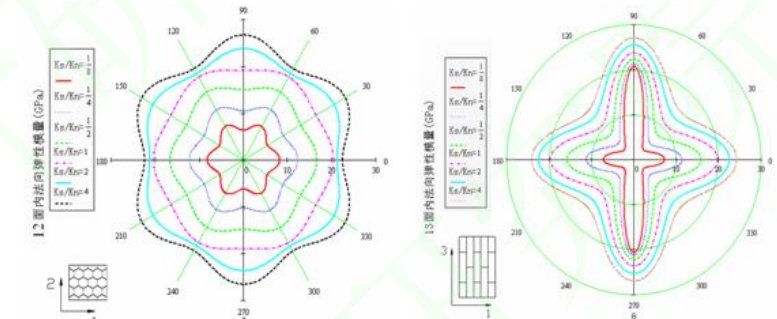
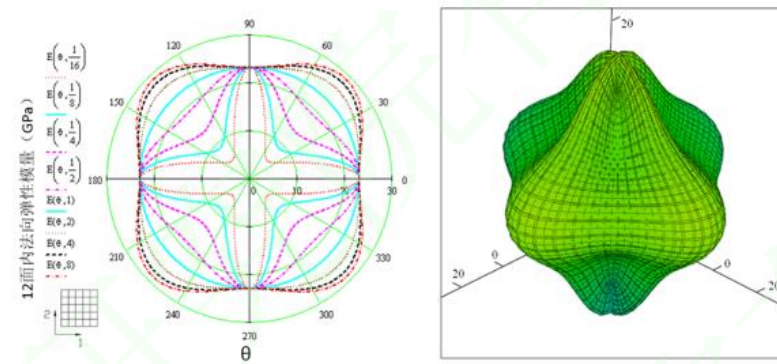


基体+纤维

$$[S] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} + \frac{1}{K_{a1}S_1} & -\frac{v_1}{E_1} & -\frac{v_1}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{v_1}{E_1} & \frac{1}{E_1} + \frac{1}{K_{a2}S_2} & \frac{v_1}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{v_1}{E_1} & -\frac{v_1}{E_1} & \frac{1}{E_1} + \frac{(b_1^2 + b_2^2)}{2K_{a3}S_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_1} + \frac{1}{K_{r1}S_1} + \frac{b_1}{K_{c1}S_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_1} + \frac{b_1}{K_{r1}S_1} + \frac{1}{K_{c1}S_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_1} + \frac{1}{K_{r1}S_1} + \frac{1}{K_{c1}S_1} \end{bmatrix}$$

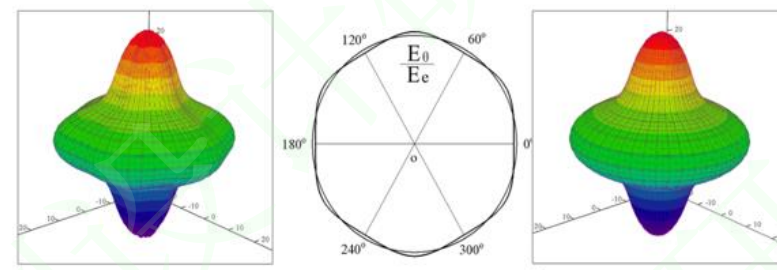
$$\begin{array}{cccccccc}
 \left[\frac{1-v_1}{4E_1} + \frac{5}{8K_1 r} + \frac{1}{4G_1} \right] \frac{3-v_1}{4E_1} \frac{5}{8K_1 r} \frac{5}{4G_1} & \frac{v_1}{E_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \frac{3-v_1}{4E_1} \frac{5}{8K_1 r} \frac{1}{4G_1} & \frac{1-v_1}{4E_1} \frac{5}{8K_1 r} \frac{5}{4G_1} & \frac{v_1}{E_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 -\frac{v_1}{E_1} & \frac{v_1}{E_1} & \frac{1}{E_1} + \frac{h_3}{K_n S_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_1} + \frac{1}{\sqrt{3} K_1 r} + \frac{h_3}{K_n S_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_1} + \frac{1}{\sqrt{3} K_1 r} + \frac{h_3}{K_n S_1} & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{3+3\nu_1}{E_1} + \frac{5}{2K_1 r} + \frac{1}{G_1} & 0 & 0
 \end{array}$$

$$\begin{aligned}
& \left[\begin{array}{ccccccc}
\frac{1-v_1}{4E_1} + \frac{5}{8Kr} + \frac{1}{4G_1} & \frac{3-v_1}{4E_1} + \frac{5}{8Kr} + \frac{1}{4G_1} & -\frac{v_1}{E_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
\frac{3-v_1}{4E_1} + \frac{5}{8Kr} + \frac{1}{4G_1} & \frac{1-v_1}{4E_1} + \frac{5}{8Kr} + \frac{1}{4G_1} & -\frac{v_1}{E_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
-\frac{v_1}{E_1} & -\frac{v_1}{E_1} & \frac{1}{E_1} + \frac{h_3}{K_{xy}S_3} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_1} + \frac{1}{\sqrt{3}Kr} + \frac{h_3}{K_{xy}S_3} & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_1} + \frac{1}{\sqrt{3}Kr} + \frac{h_3}{K_{xy}S_3} & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{3+3\nu_1}{E_1} + \frac{5}{2Kr} + \frac{1}{G_1} & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0
\end{array} \right]
\end{aligned}$$



(a) 12 面内

(b) 13 面内



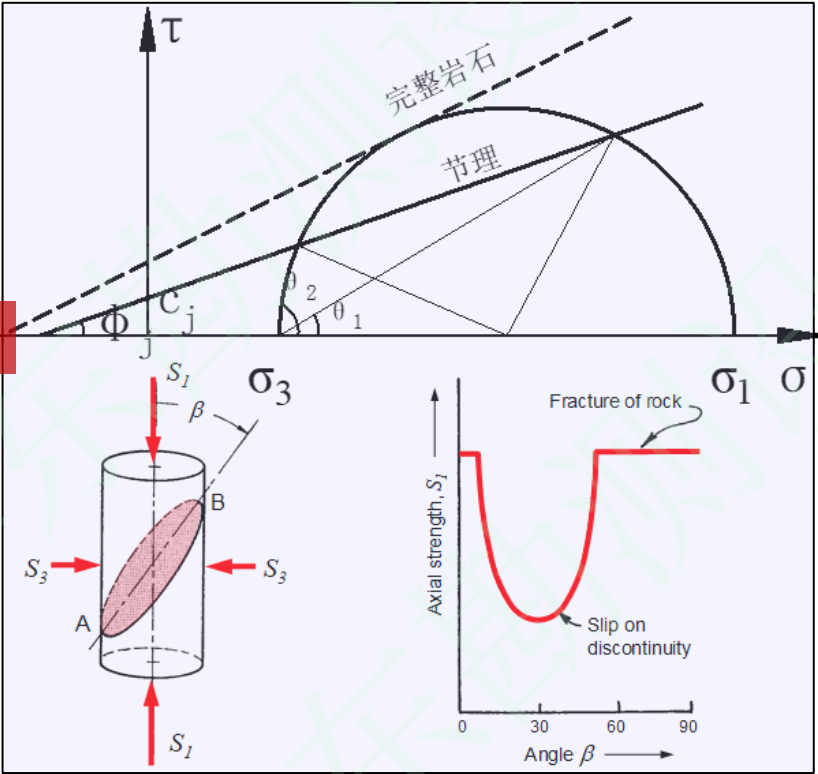
准横观各向同性

横观各向同性

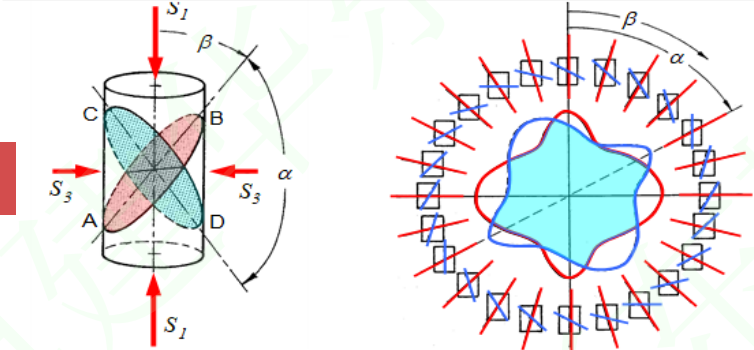
02 白鹤滩地下工程 - (1) 柱状节理及尾水调压室

本构模型开发：强度准则

1组节理影响



2组节理影响



3、4组节理影响



抗剪准则:

$$f_1^s = \sqrt{\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2} + \sigma_{11} \tan \phi_1 - c_1$$

$$f_2^s = \sqrt{\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2} + \sigma_{22} \tan \phi_2 - c_2$$

$$f_3^s = \sqrt{\sigma_{13}^2 + \sigma_{23}^2} + \sigma_{33} \tan \phi_3 - c_3$$

抗拉准则:

$$f_1^t = \sigma_{11} - \sigma_1^t$$

$$f_2^t = \sigma_{22} - \sigma_2^t$$

$$f_3^t = \sigma_{33} - \sigma_3^t$$

不关联剪切屈服势函数:

$$g_1^s = \sqrt{\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2} + \sigma_{11} \tan \psi_1$$

$$g_2^s = \sqrt{\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2} + \sigma_{22} \tan \psi_2$$

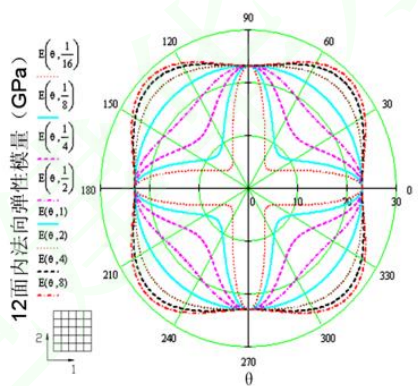
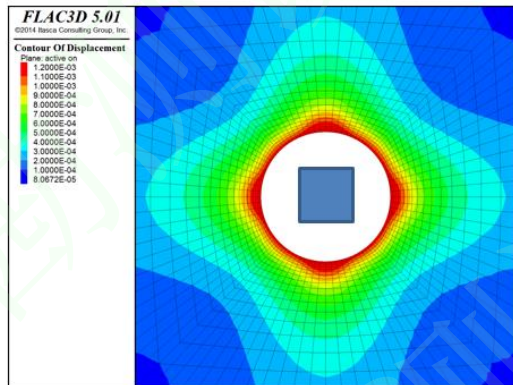
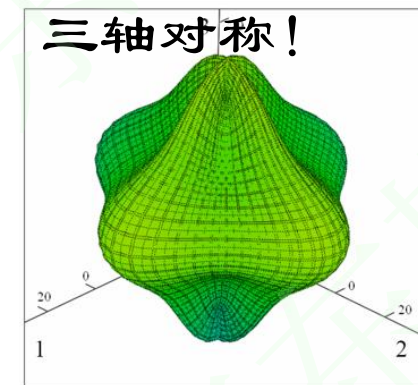
$$g_3^s = \sqrt{\sigma_{13}^2 + \sigma_{23}^2} + \sigma_{33} \tan \psi_3$$

ψ_i 为节理的膨胀角。

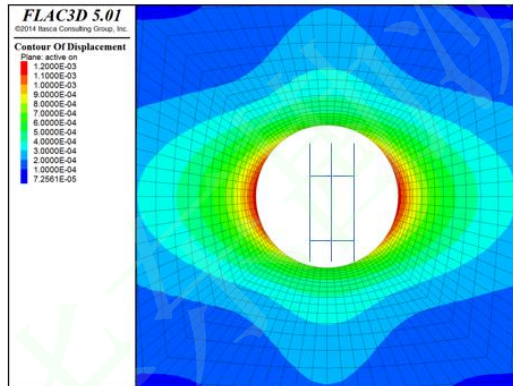
02 白鹤滩地下工程 - (1) 柱状节理及尾水调压室

本构模型验证：变形计算

各向异性变形计算结果完全一致！

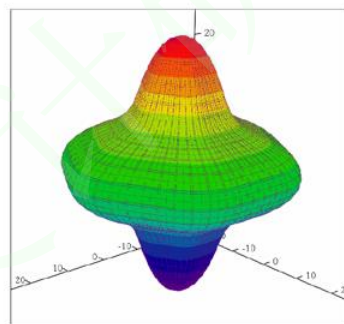


解析法

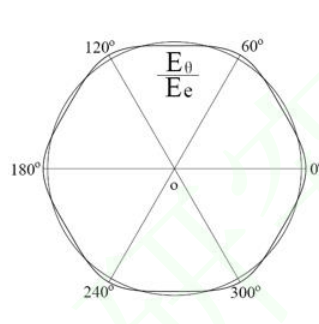


数值法

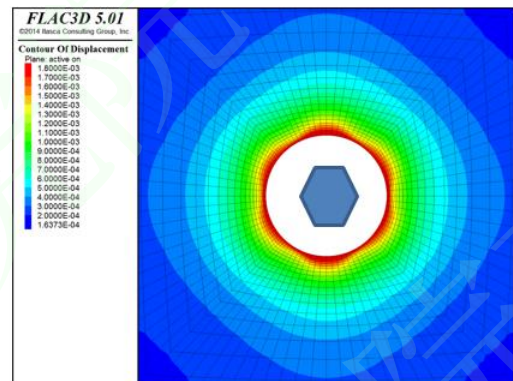
规则四棱柱



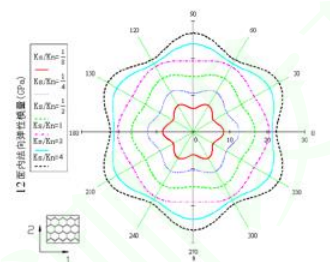
(a) 法向弹模的三维视图



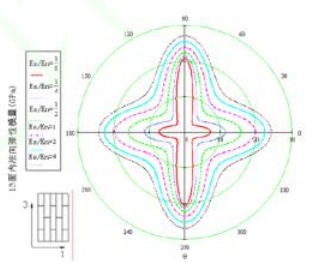
(b) 12面内



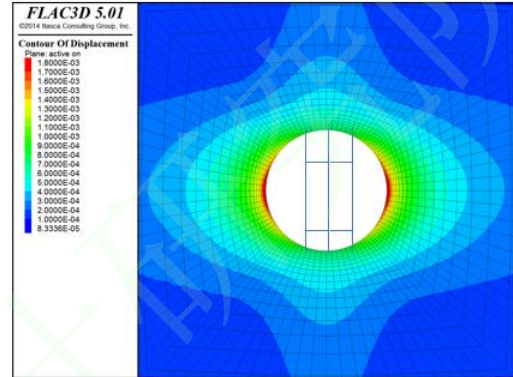
四轴对称！



(a) 12面内



(b) 13面内



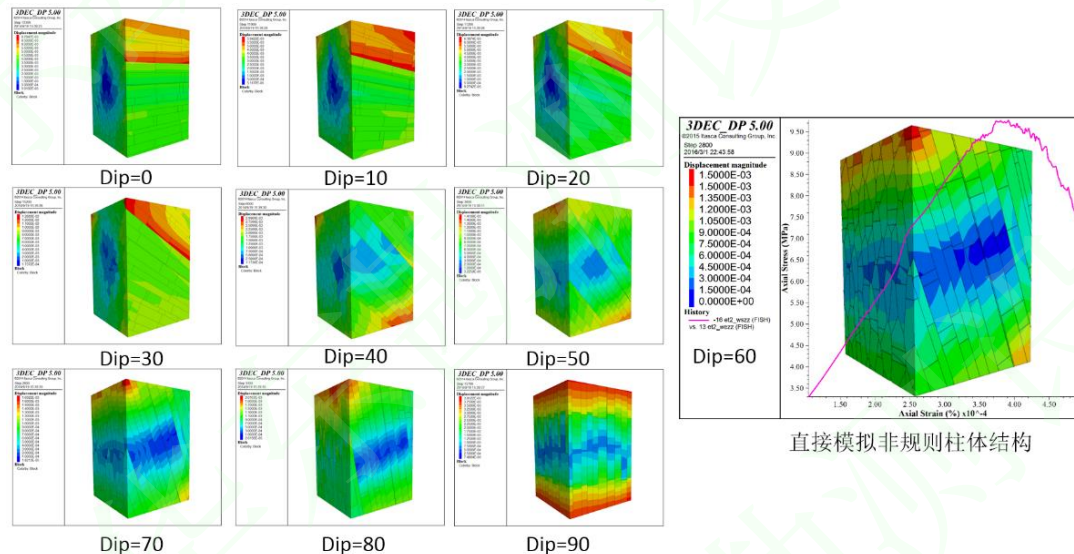
解析法

数值法

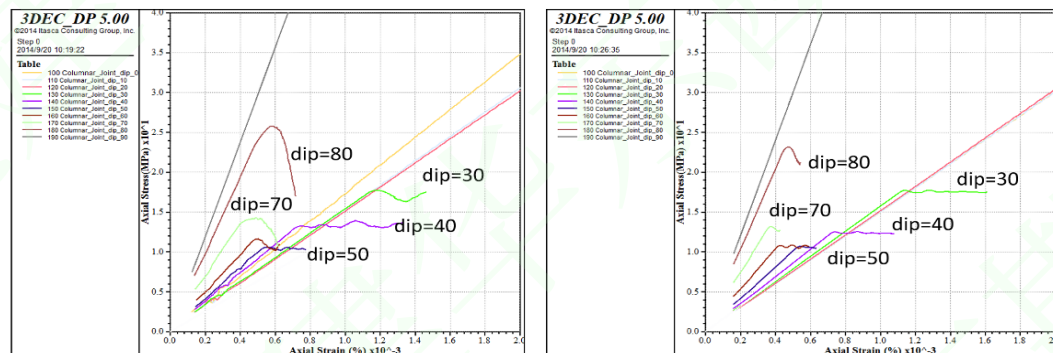
规则六棱柱

02 白鹤滩地下工程 - (1) 柱状节理及尾水调压室

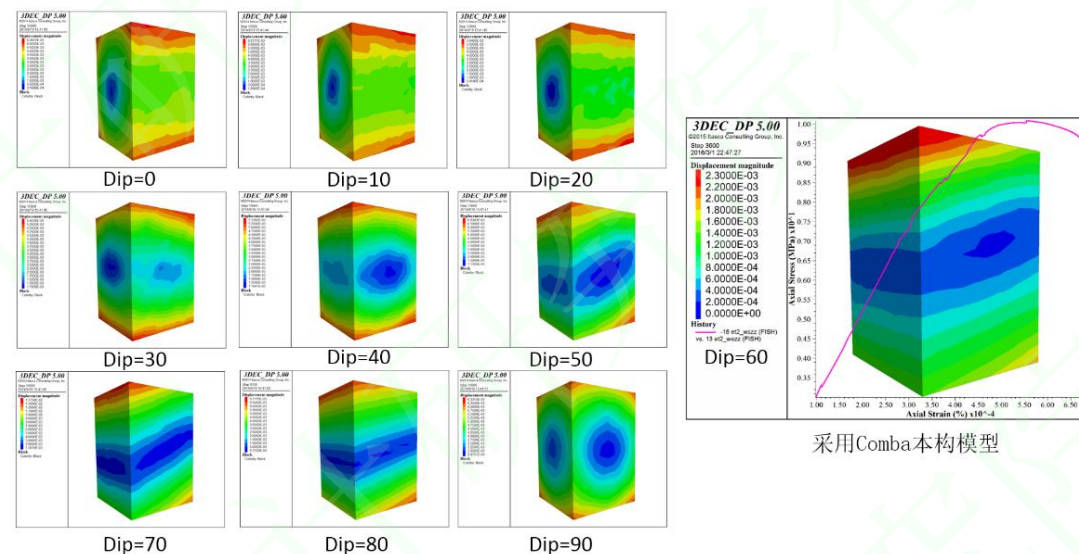
本构模型验证：强度计算



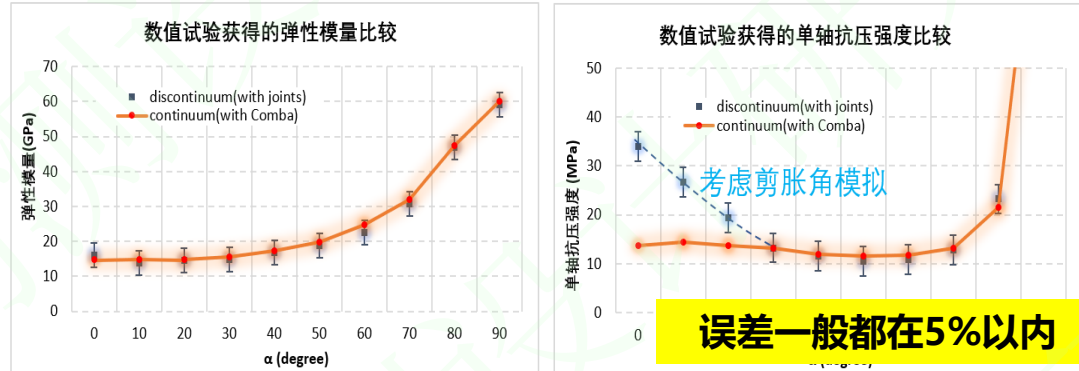
非连续方法数值试验结果



应力应变曲线比较



Comba本构模型方法数值试验结果



各向异性强度比较

02 白鹤滩地下工程

- (1) 柱状节理及尾水调压室

本构模型功能比较

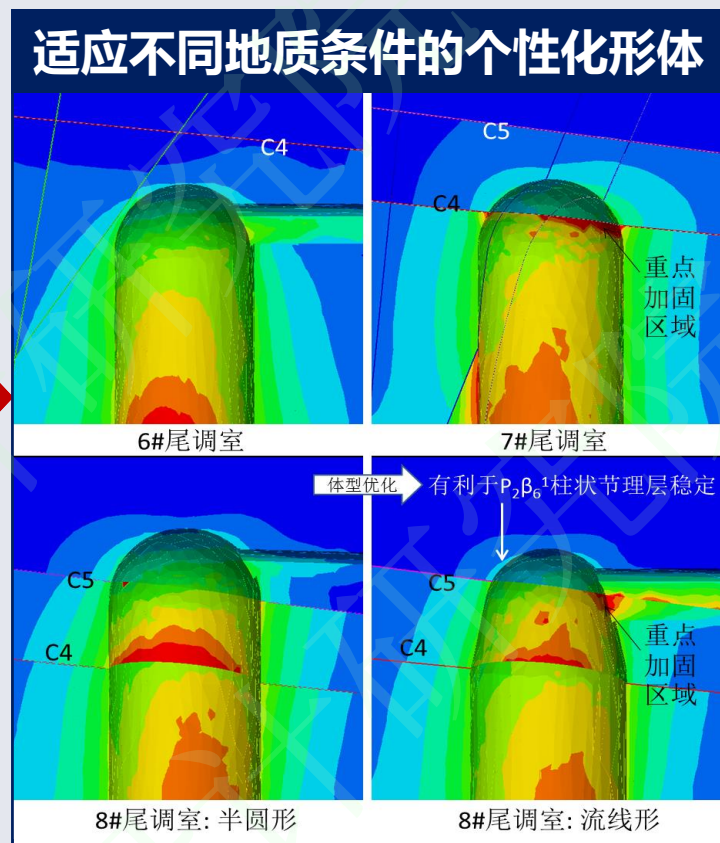
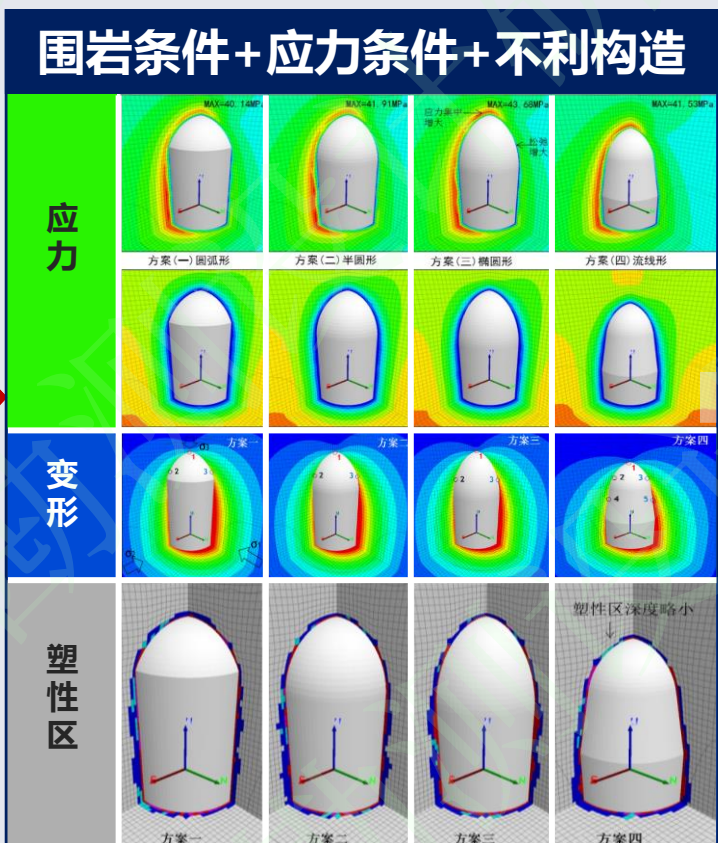
Comba模型可以扩展考虑3~4组节理影响，能够同时反映柱状节理岩体固有的各向异性变形、强度和剪胀特征。从而实现对海量柱状节理的高效模拟！

节理岩体模型	节理组数	各向异性变形	各向异性强度
横观各向同性 Anisotropic (Transversely-Elastic) Model	1	✓	
正交各向异性 Orthotropic Elastic Model	3	✓	
遍布节理模型 Ubiquitous-Joint Model	1		✓
双遍布节理软化/硬化模型 Bilinear Strain-Softening/Hardening Ubiquitous-Joint Model	2		✓
柱状节理岩体模型 Comba Model	3~4	✓	✓

解决了柱状节理岩体缺乏合理本构模型的难题

02 白鹤滩地下工程 - (1) 柱状节理及尾水调压室

巨型穹顶个性化结构形体

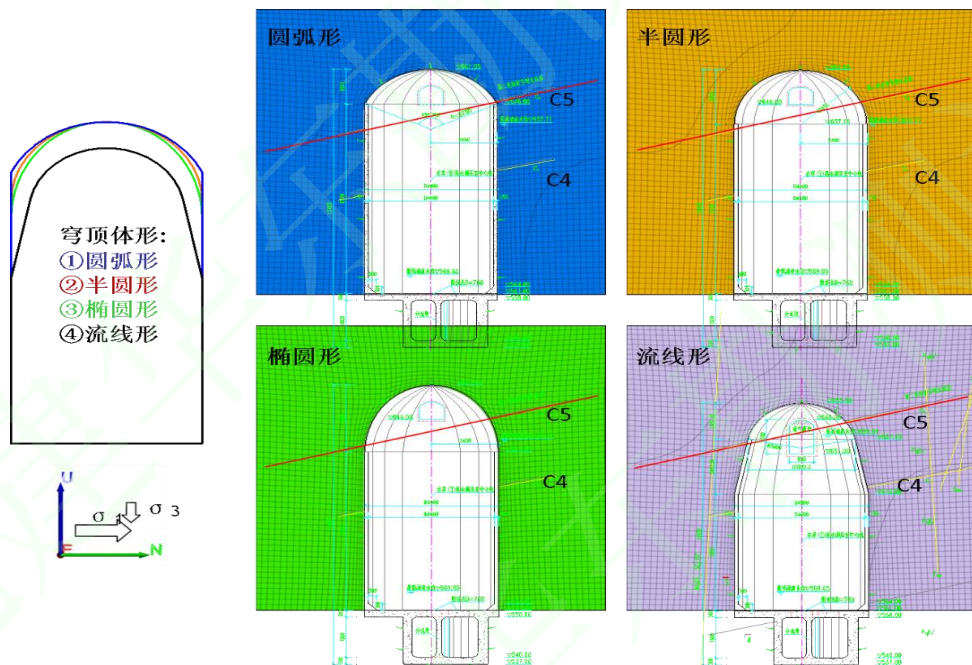


调整穹顶曲率，优化穹顶形体，最大程度发挥拱效应

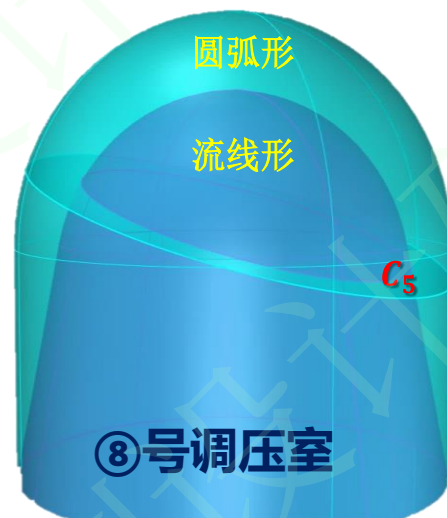
02 白鹤滩地下工程 - (1) 柱状节理及尾水调压室

“流线形”结构形体 - (设计阶段)

围岩条件+柱状节理+层间错动带+地应力水平

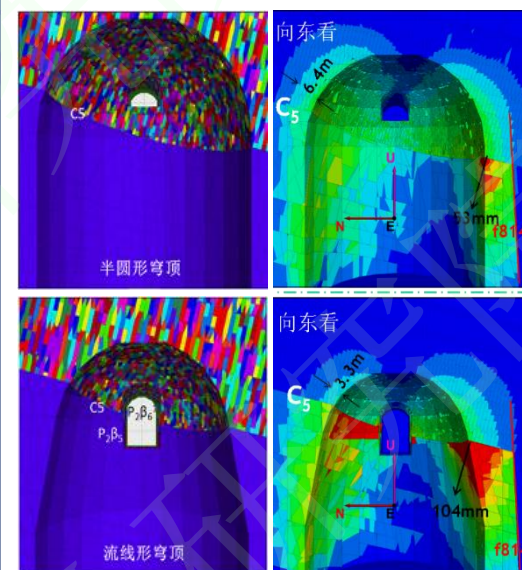


兼顾顶拱减跨和斜墙稳定



流线形优势: 升高(10m↓)
减跨(9m↓)

增强整体稳定性

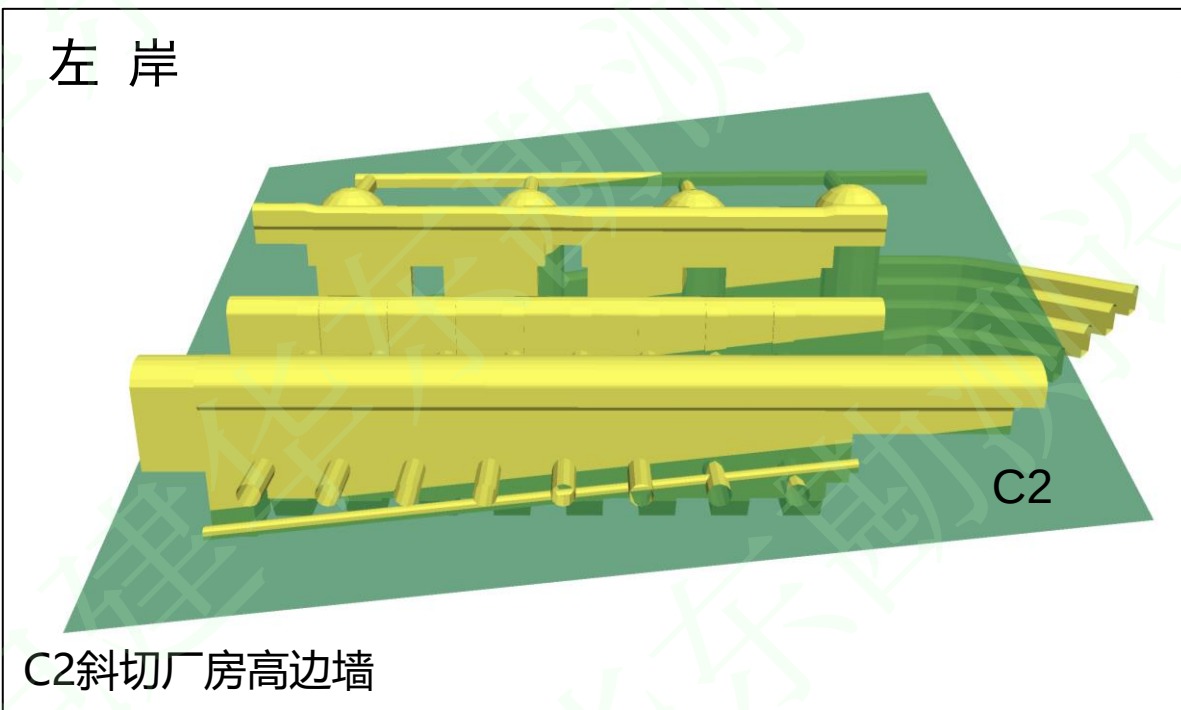


- 减少柱状节理出露范围
- 减小变形和松弛区深度

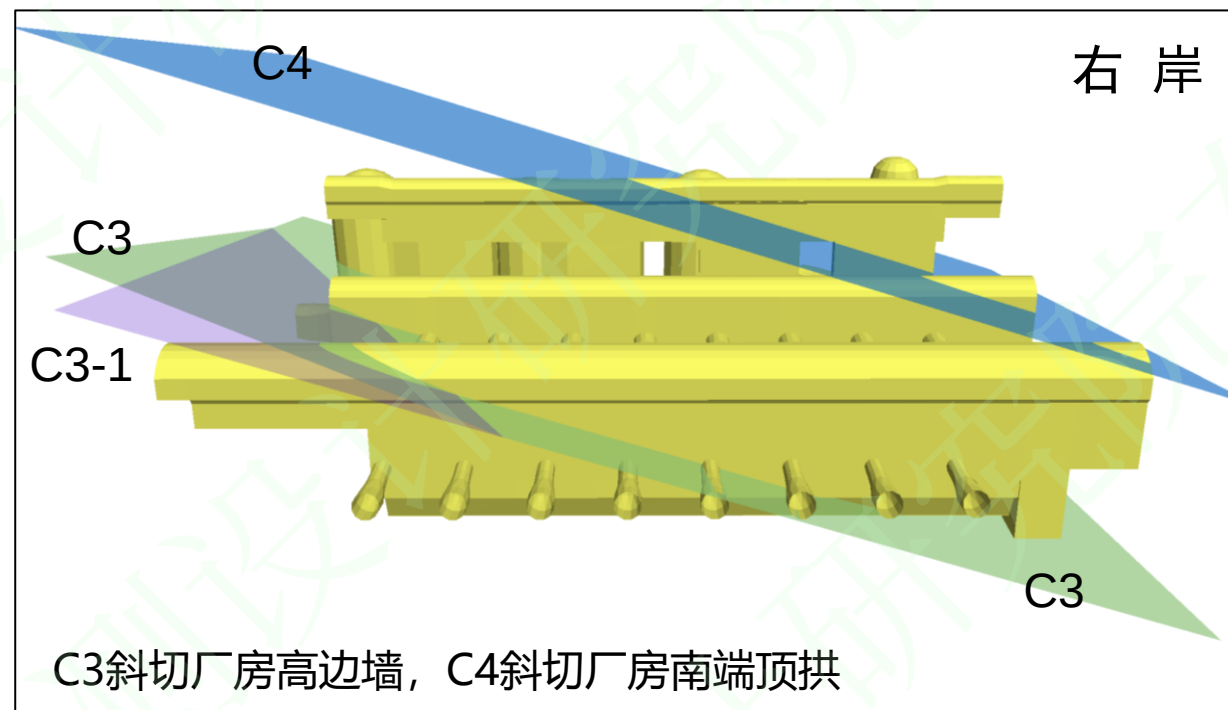
02 白鹤滩地下工程

- (2) 错动带、高应力与厂房围岩稳定

左 岸



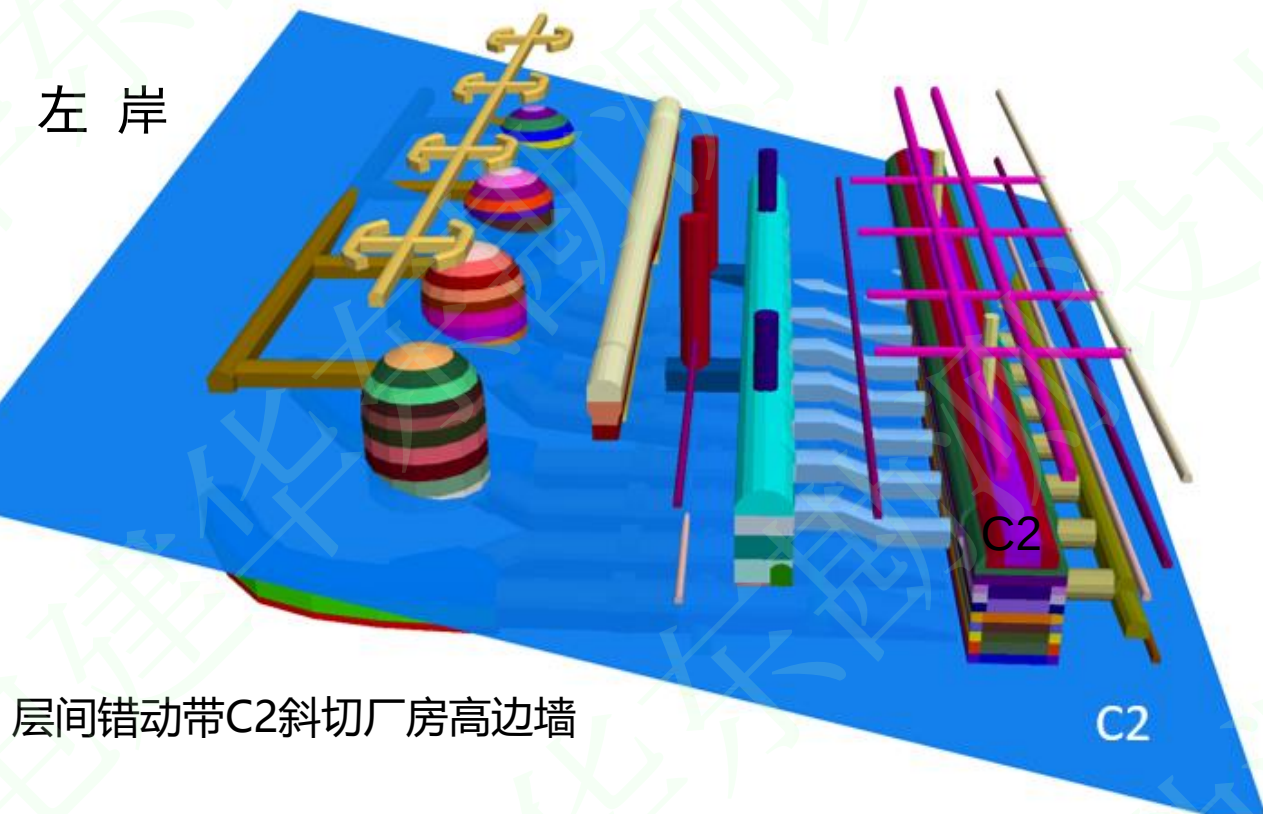
右 岸



02 白鹤滩地下工程

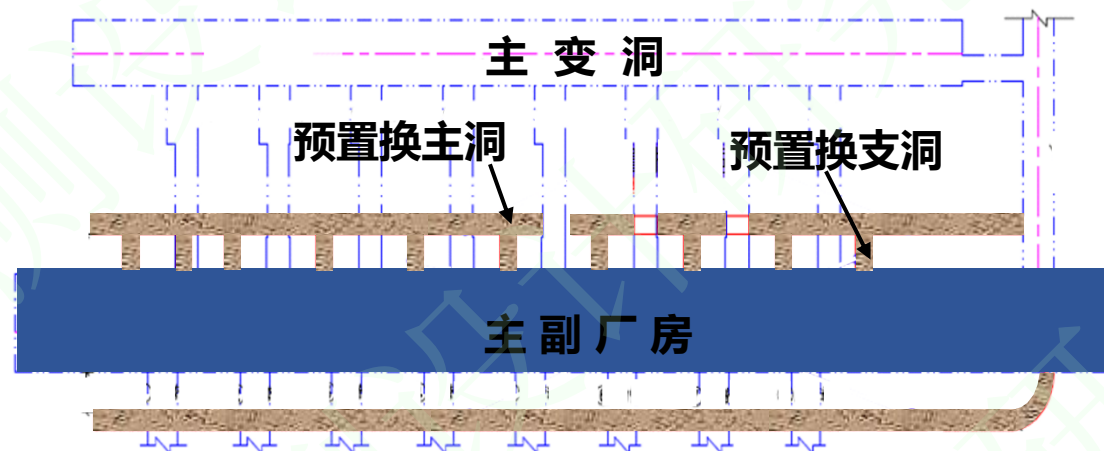
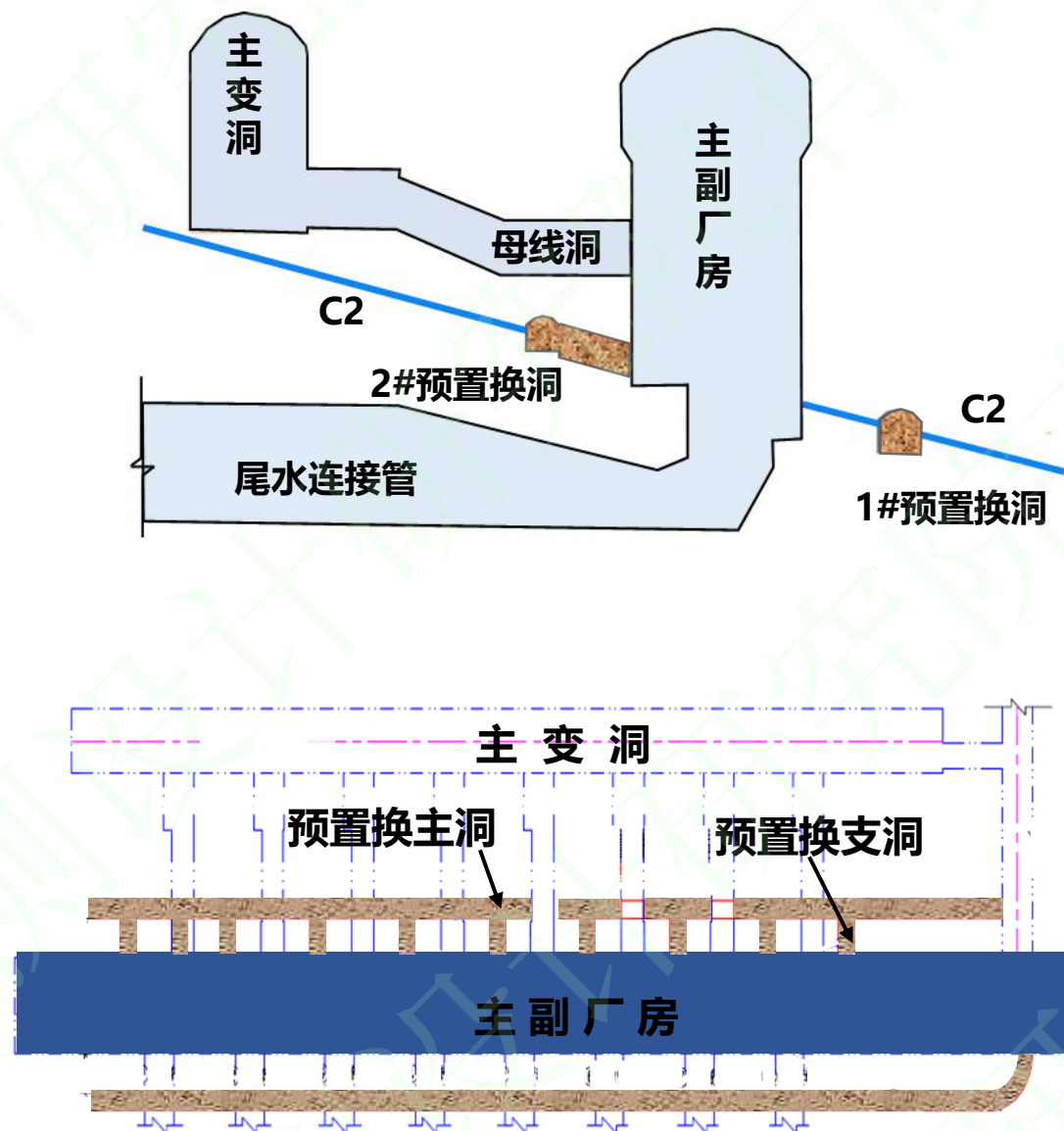
- (2) 错动带、高应力与厂房围岩稳定

左岸



层间错动带C2斜切厂房高边墙

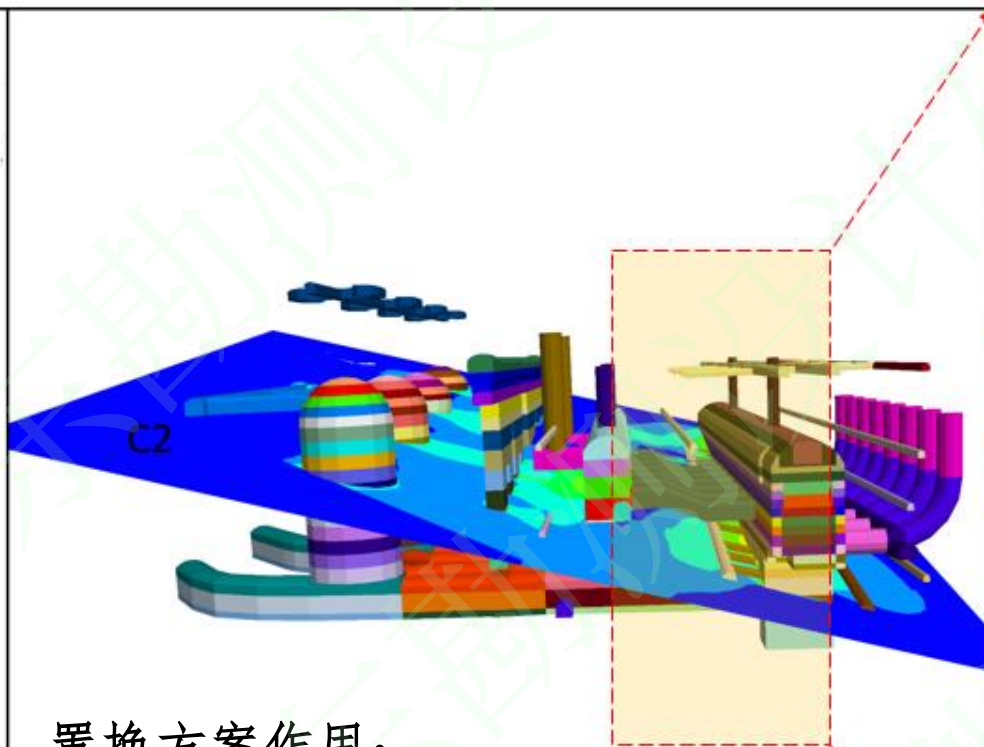
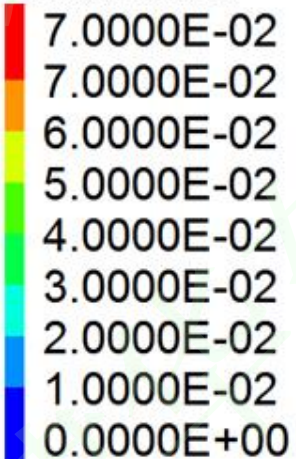
C2



02 白鹤滩地下工程 - (2) 错动带、高应力与厂房围岩稳定

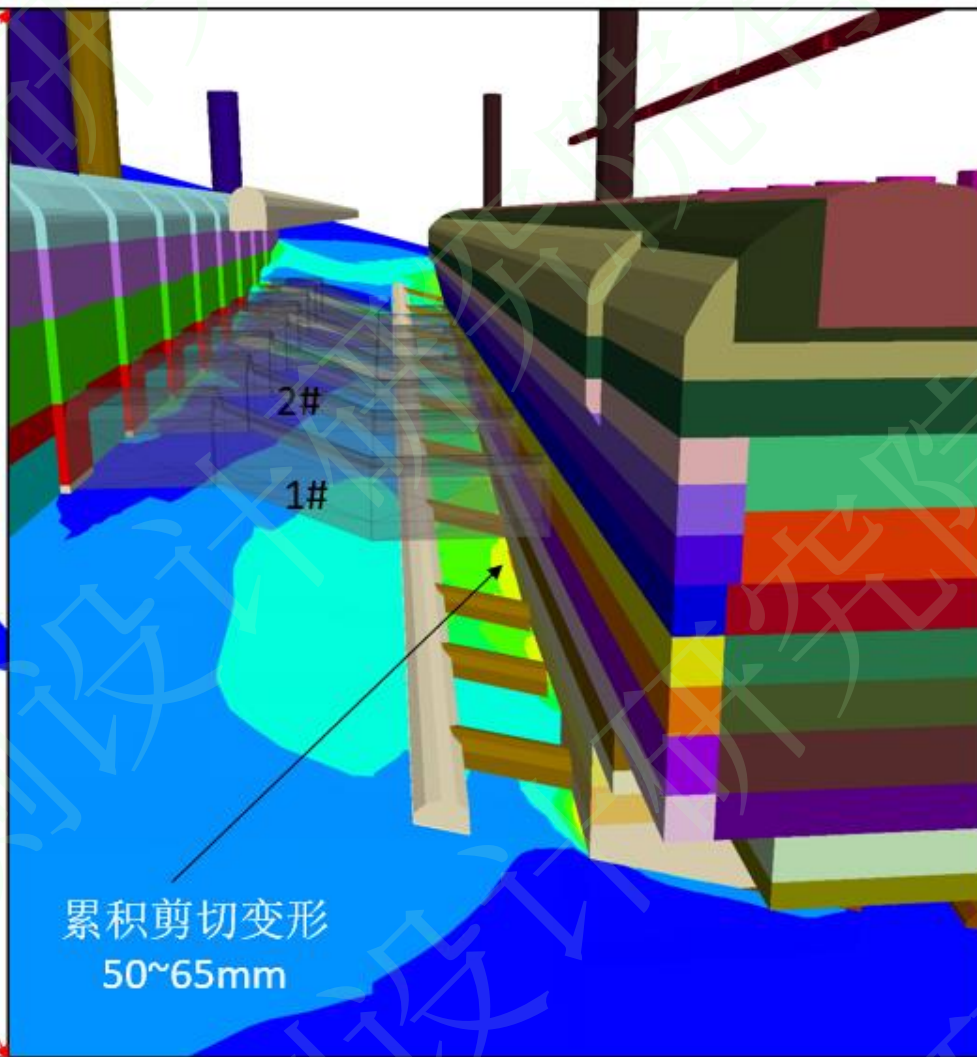
3DEC_DP 5.20
©2017 Itasca Consulting Group, Inc.
Step 20543
2017/5/12 16:32:00

C2剪切变形/m

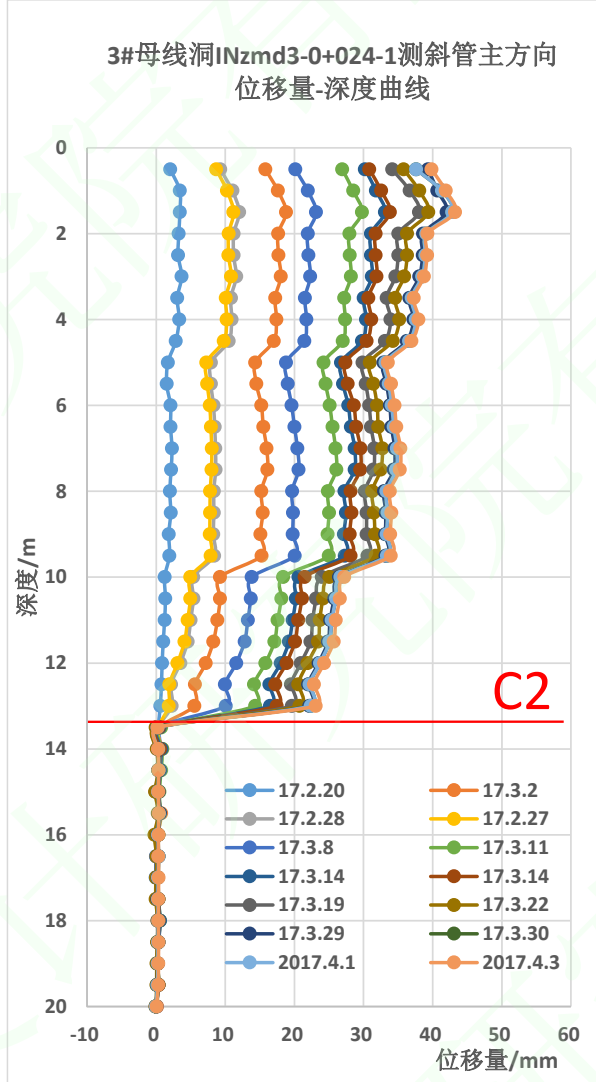
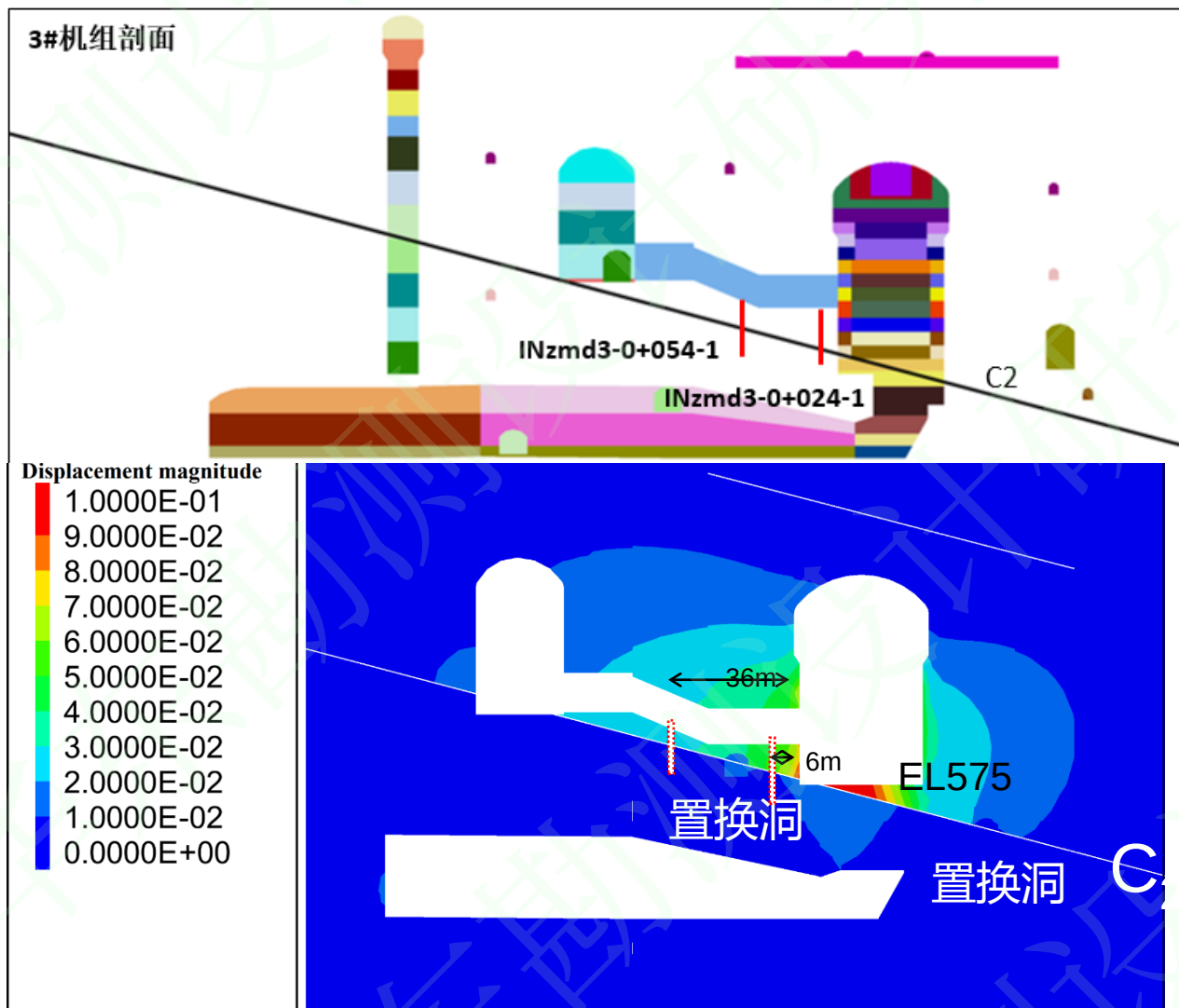
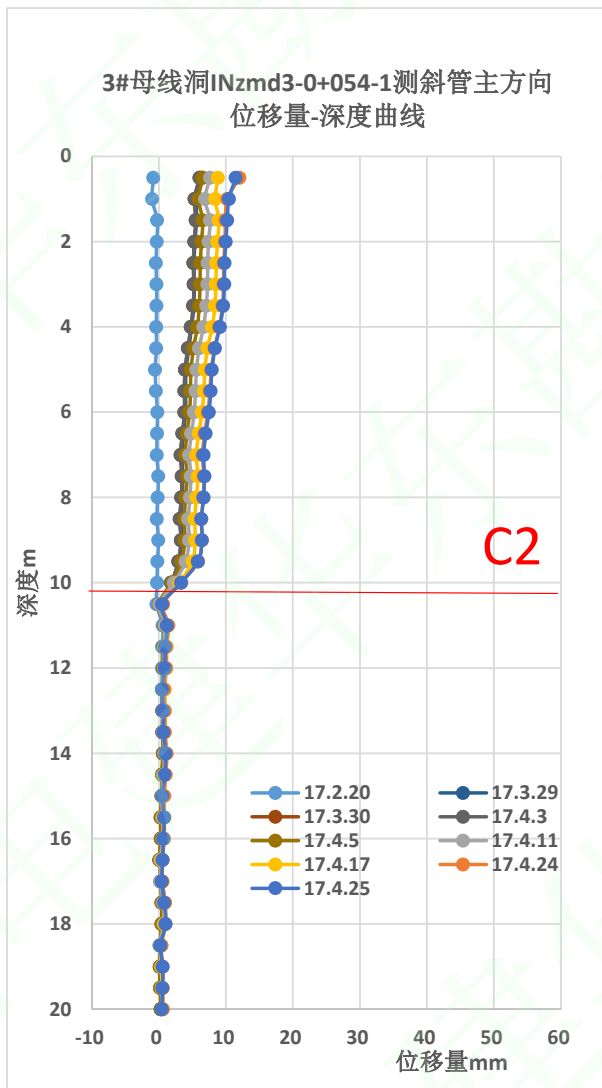


置换方案作用:

- 抑制浅层岩体过度松弛;
- 阻断深层错动变形
- 防范了“泥化”软弱带潜在流变



02 白鹤滩地下工程 - (2) 错动带、高应力与厂房围岩稳定



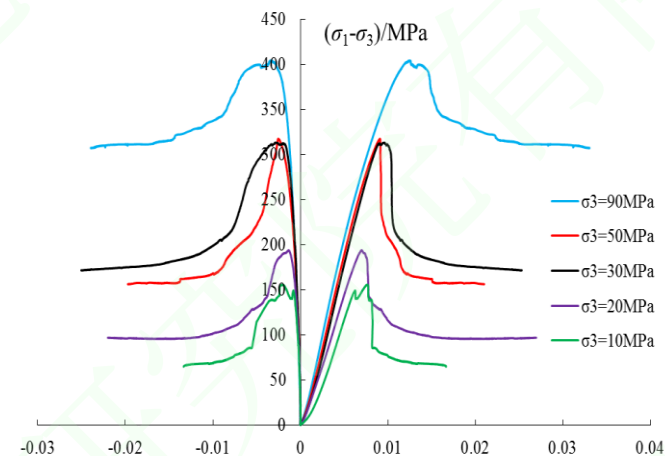
02 白鹤滩地下工程

- (2) 错动带、高应力与厂房围岩稳定

杏仁状玄武岩

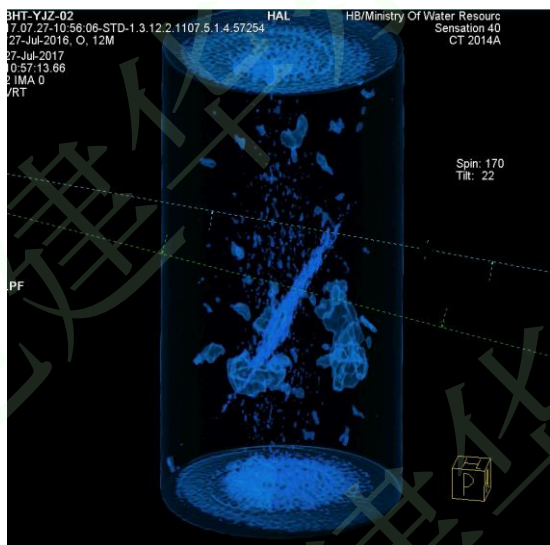


单条主裂纹破坏



脆-延-塑转换特征

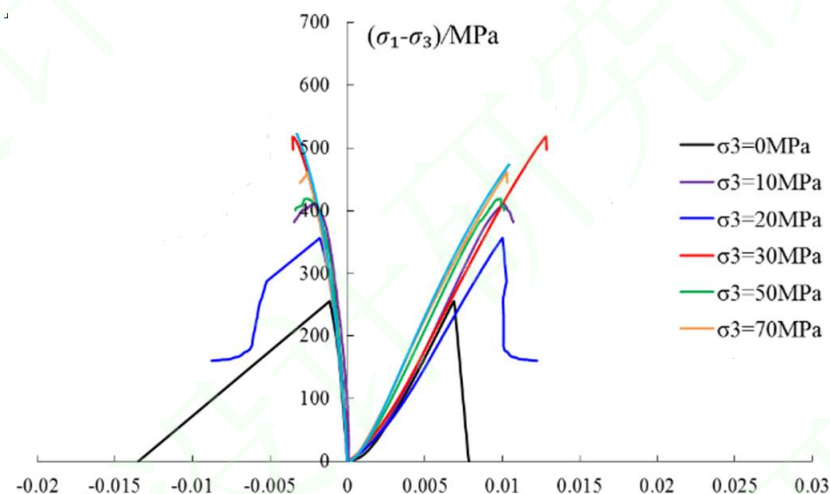
隐晶质玄武岩



微裂隙分布(CT试验)

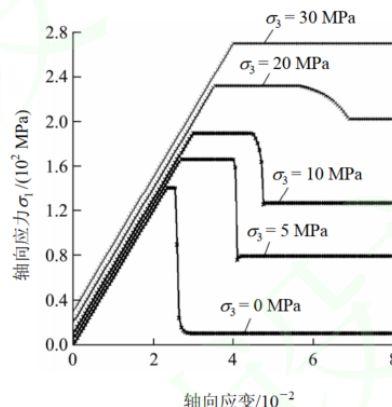


岩样解体式破坏



近似理想脆性特征

脆-延-塑转换特征描述方法



(b) 数值模拟的轴向应力-轴向应变曲线

图 10 数值模拟中大理岩随着围压增长而表现出的脆-延-塑转换力学特征

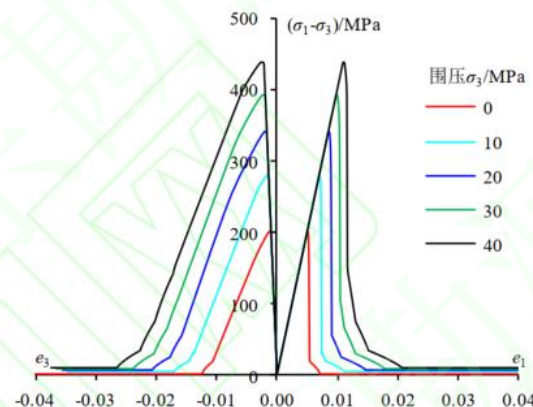


图 13 不同围压条件下隐晶质玄武岩全应力-应变曲线

近似理想脆性特征描述方法

第29卷 第10期
2010年10月

岩石力学与工程学报
Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering

Vol.29 No.10
Oct., 2010

锦屏二级水电站深埋大理岩力学特性研究

张春生, 陈祥荣, 侯 靖, 褚卫江
(中国水电顾问集团 华东勘测设计研究院, 浙江 杭州 310014)

摘要: 采用锦屏二级水电站埋深 2 000 m 的白山组大理岩试样进行单轴压缩-声发射试验, 通过试验结果的分析确定白山组大理岩的启裂强度和损伤强度, 分别为 0.4~0.5 倍和 0.8 倍的单轴抗压强度, 试验结果与加拿大 URL 针对 Lac du Bonnet 花岗岩的测试结果相接近。针对白山组深埋大理岩开展室内三轴压缩试验, 试验结果显示锦屏白山组大理岩随着围压的增大其峰后应力-应变曲线具有明显的脆-延-塑转换特征。对比锦屏白山组大理岩、Lac du Bonnet 花岗岩以及三峡花岗岩的三轴试验成果, 说明大理岩和花岗岩峰后力学特征的显著差异。采用 Hoek-Brown 强度准则的本构模型描述大理岩的脆-延-塑转换特征, 并将研究成果应用于引水隧洞的围岩损伤深度预测。

关键词: 岩石力学; 深埋隧洞; 大理岩; 声发射; 启裂强度; 损伤强度; 脆-延-塑转换; Hoek-Brown 强度准则
中图分类号: TU 45 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6915(2010)10-1999-11

岩石力学与工程学报
Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering

白鹤滩水电站隐晶质玄武岩力学特性及 Hoek-Brown 本构模型描述

张春生¹, 朱永生^{1,2}, 褚卫江^{1,2}, 刘 宁^{1,2}

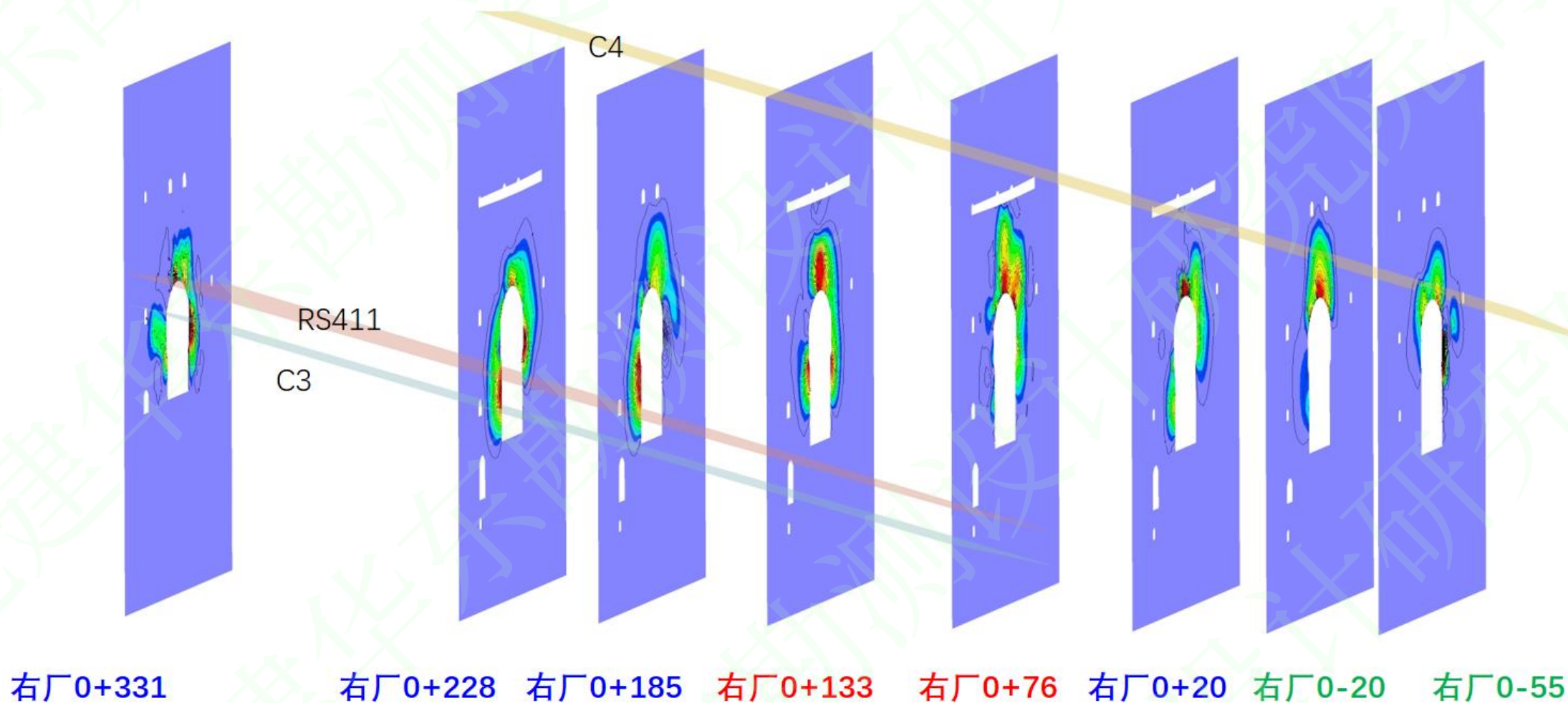
(1. 中国电建集团 华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122; 2. 浙江中科依泰斯卡岩石工程研发有限公司, 浙江 杭州 311122)

摘要: 依据白鹤滩水电站开展的室内单轴、三轴试验和声发射试验成果, 探讨玄武岩峰前特征强度和峰后力学行为。玄武岩启裂强度约为 0.5~0.6 倍峰值强度, 损伤强度则与峰值强度接近, 峰后具有显著的脆性性质和扩容现象, 且峰后行为与围压变化近似非相关。建立 Hoek-Brown 本构模型中塑性流动系数 γ 与岩石剪胀角 ψ 之间的换算关系, 论证模型针对玄武岩峰后脆性、扩容力学行为描述的适用性。工程应用表明, 围岩剪胀特性对变形稳定性条件的影响与开挖响应应力路径密切相关。在应力集中区, 剪胀特性愈突出、越不利于围岩稳定, 而应力松弛区缺乏扩容所需的应力条件, 剪胀特性及扩容不成为变形稳定的控制性影响因素。在深埋脆性岩体地下工程实践中, 建议针对不同工程部位据此制定差异化支护设计方案。

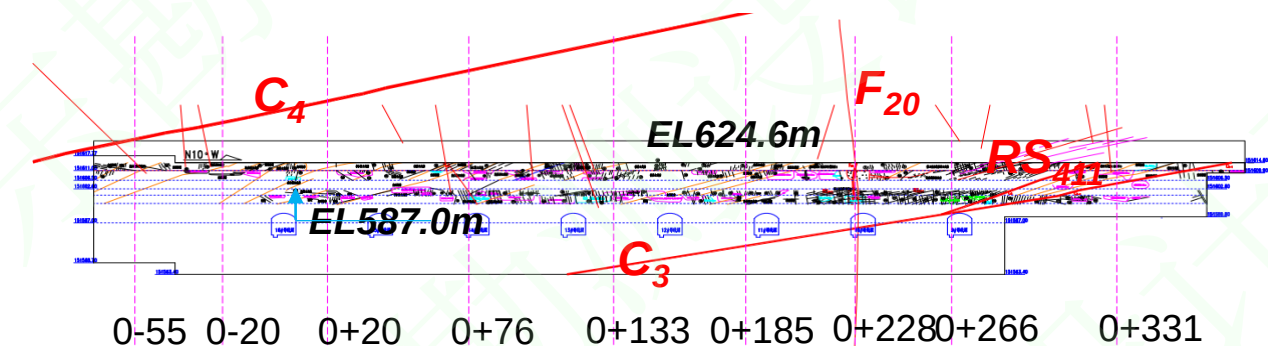
关键词: 岩石力学; 隐晶质玄武岩; 脆性岩石; 岩石扩容; 围压; Hoek-Brown 本构模型

02 白鹤滩地下工程

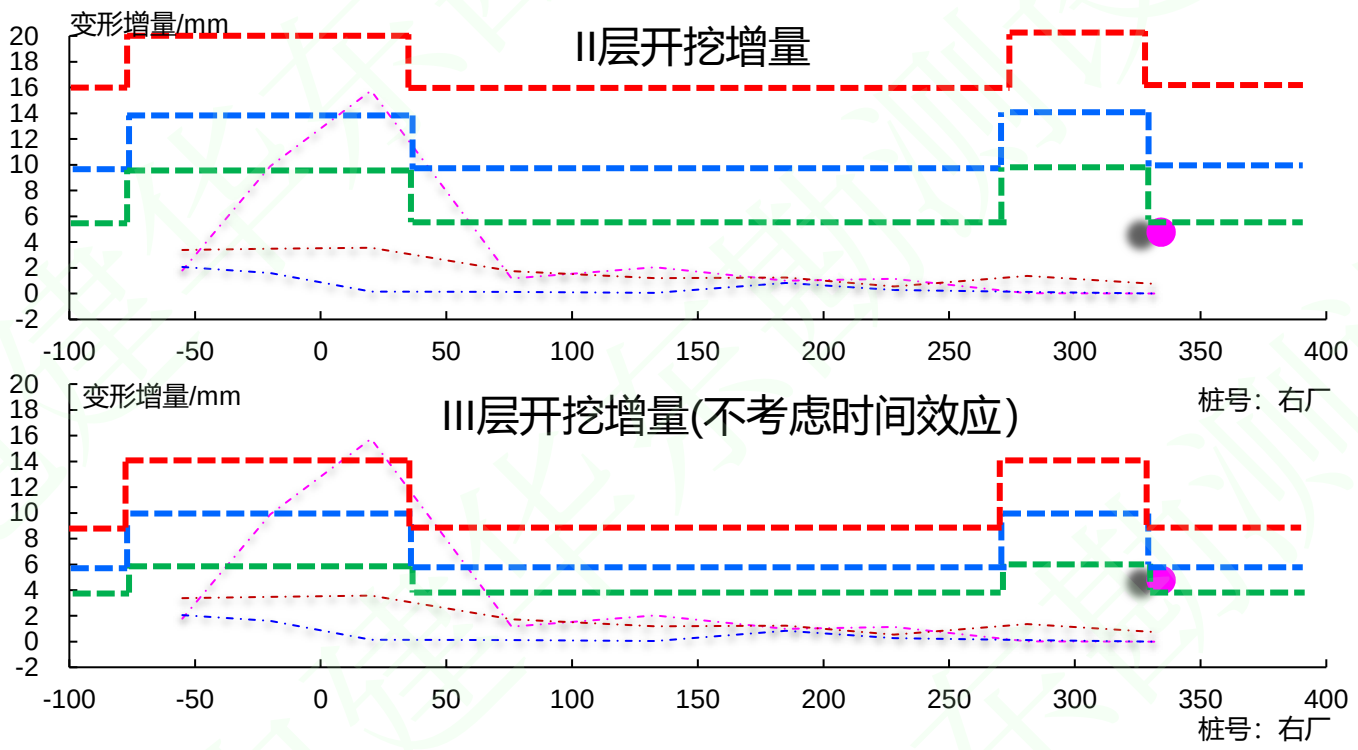
- (2) 错动带、高应力与厂房围岩稳定



02 白鹤滩地下工程 - (2) 错动带、高应力与厂房围岩稳定



各层开挖过程变形增量对比:



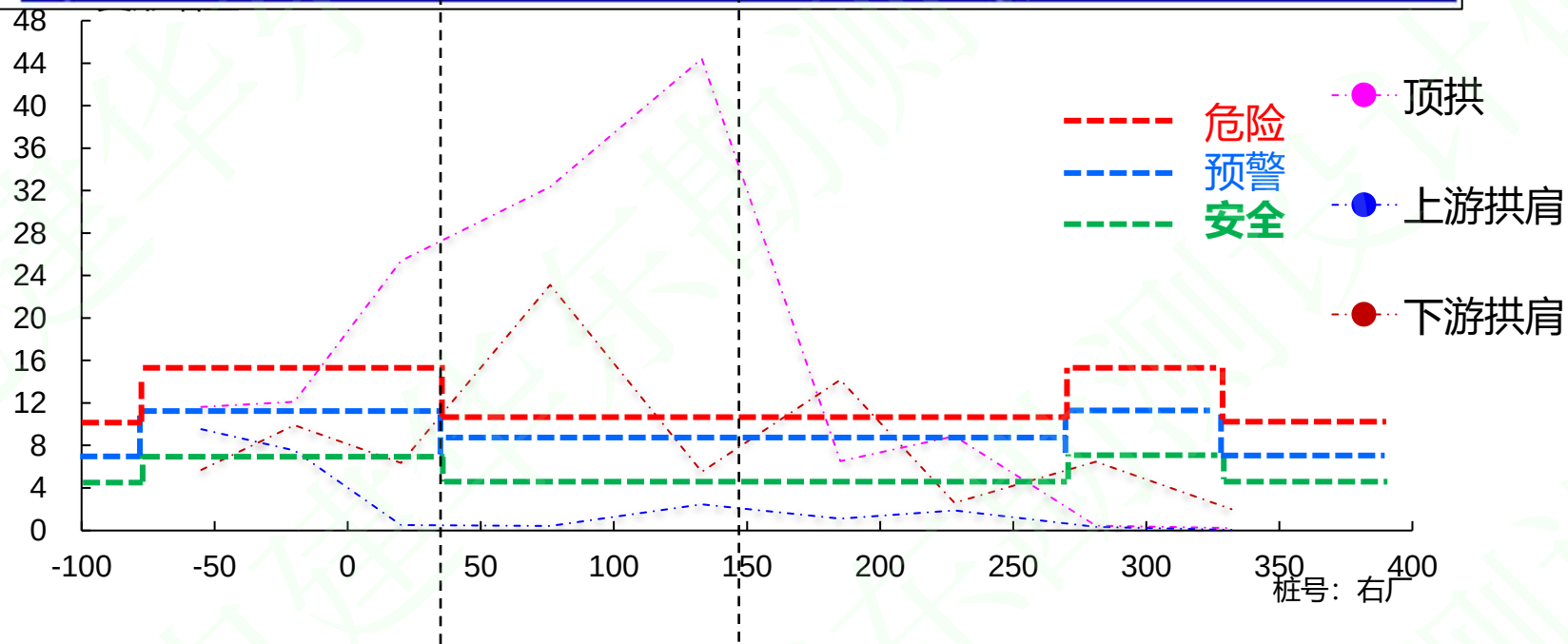
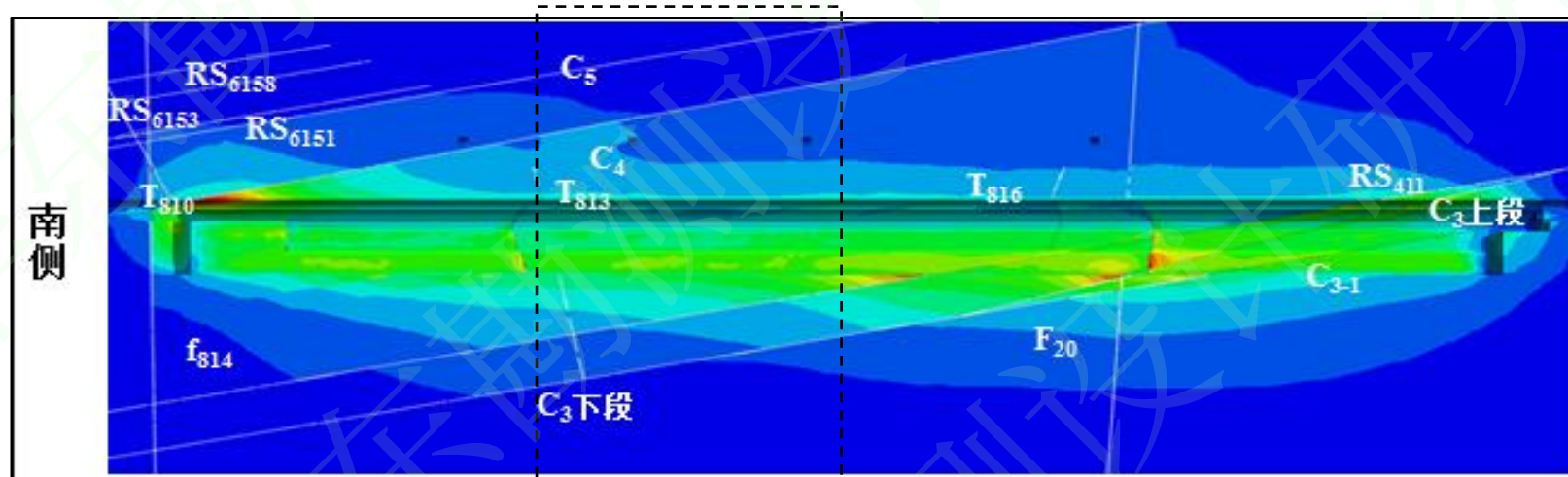
● 第II层、 III层开挖过程顶拱变形增量基本与预测规律和量值一致，未出现超过危险预警值；

说明：危险等级一般需复核分析并讨论采取工程措施。

02 白鹤滩地下工程

- (2) 错动带、高应力与厂房围岩稳定

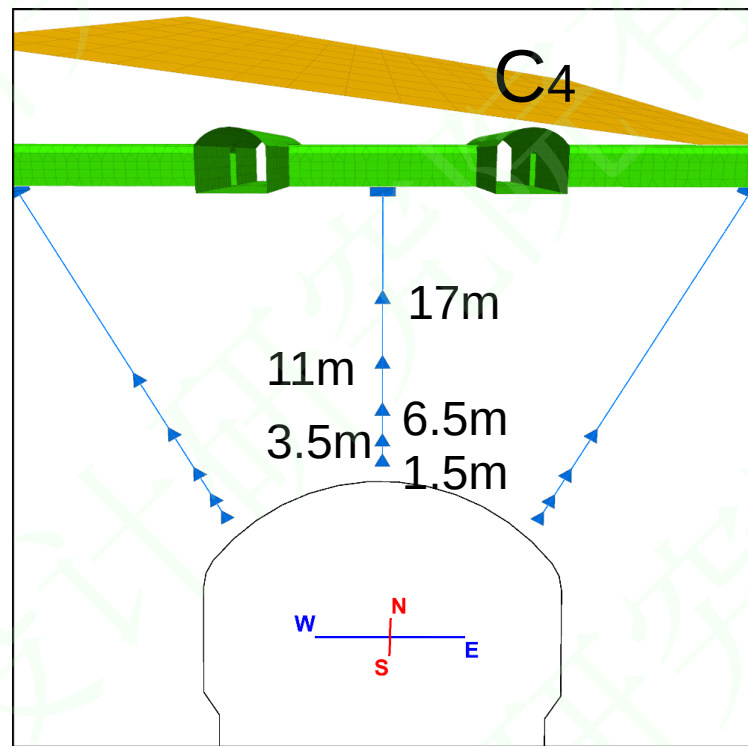
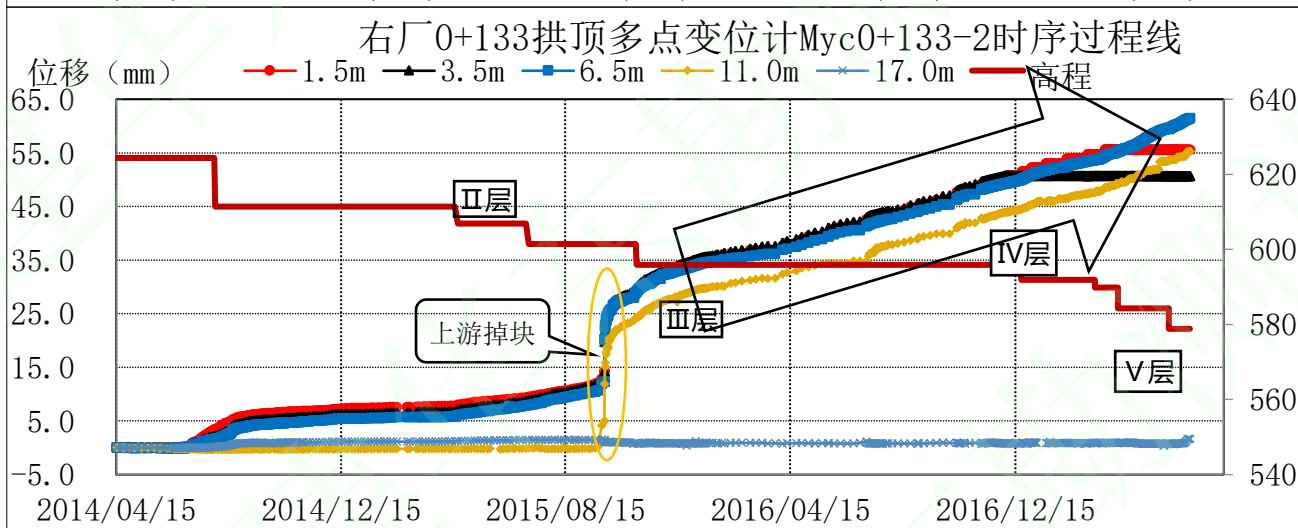
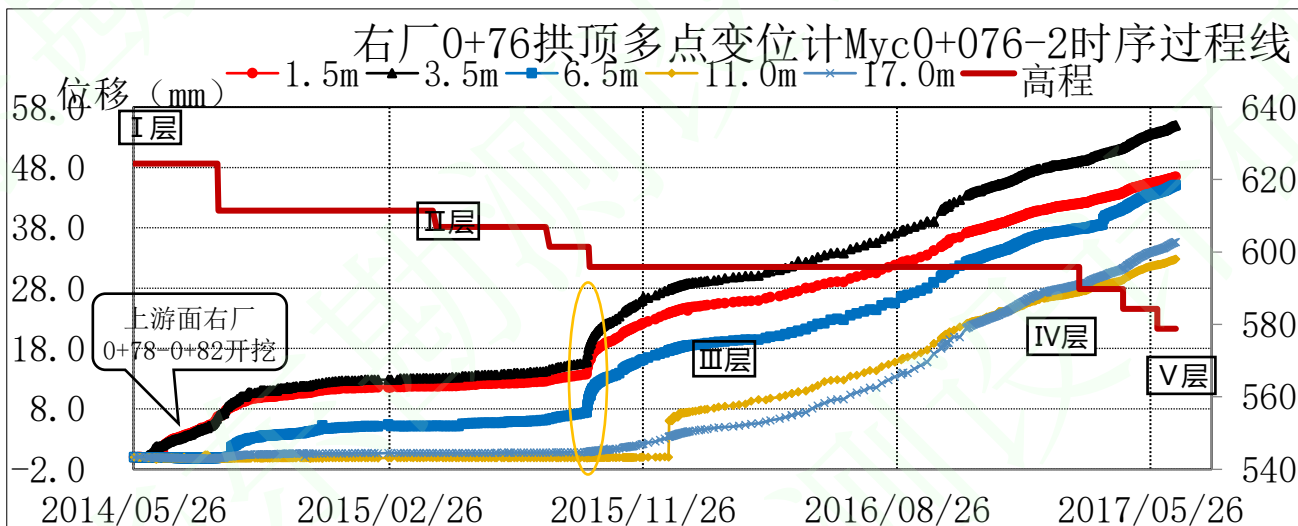
“深层变形”特征难以解释



- 第III层开挖过程完成，岩梁浇筑时期，变形较小（岩体完整性好）的0+20~0+133段顶拱变形突增；
- 持续变形，增量和增长规律都超过了常规认识、数值模拟预测。
- 变形量大于C4影响段
- 与常规认识矛盾——岩体质量好的部位整体变形大？

02 白鹤滩地下工程

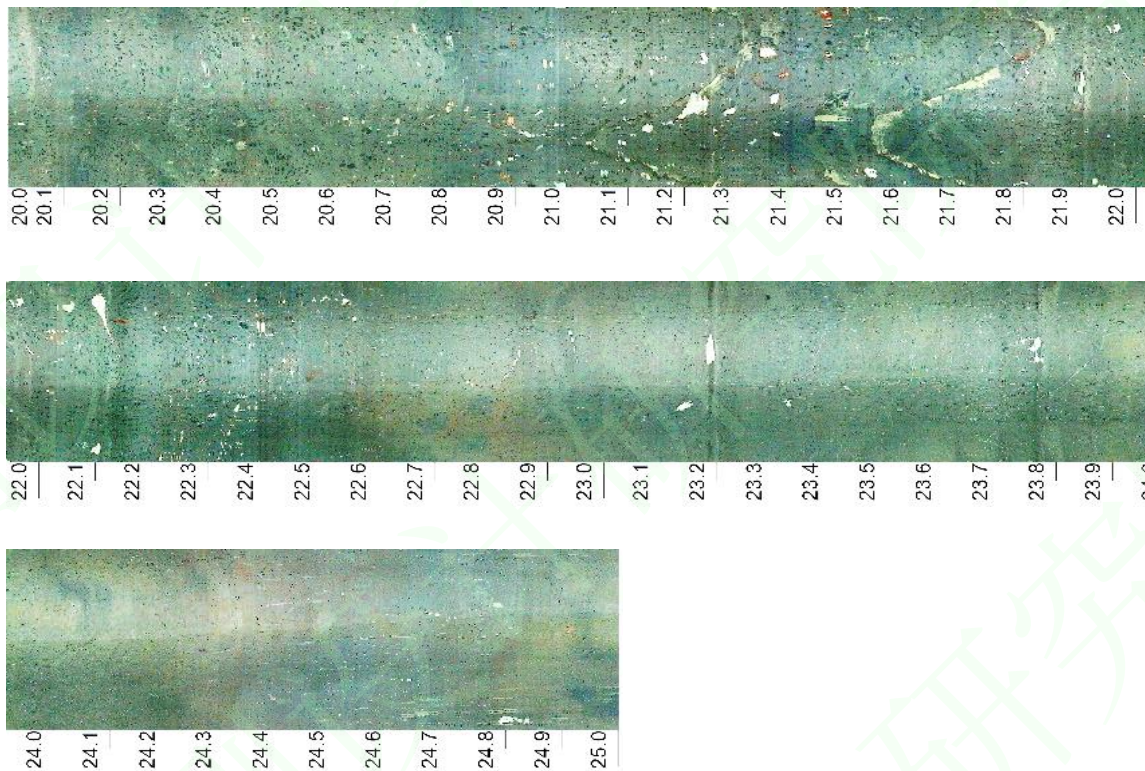
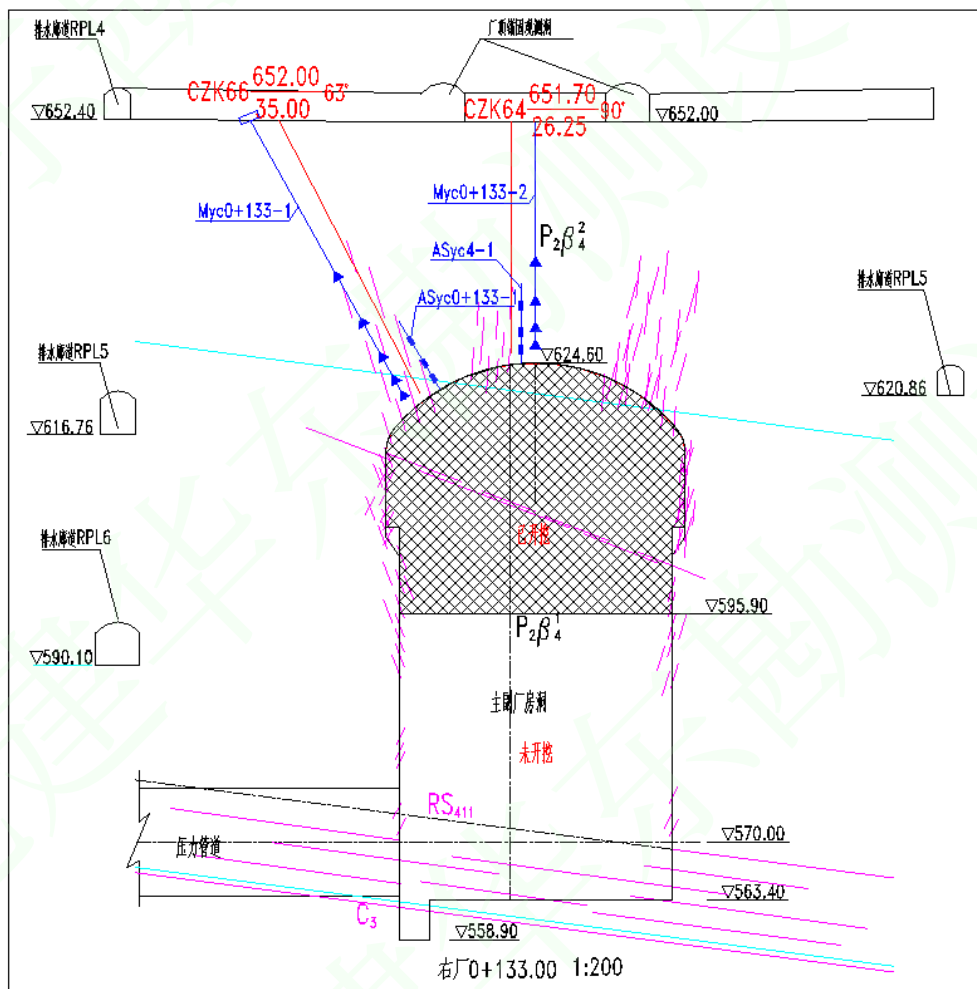
- (2) 错动带、高应力与厂房围岩稳定



- 在没有扰动下，形成了一次突增；
- 其后，不同深度的测点以相同的速率持续增长。

02 白鹤滩地下工程

- (2) 错动带、高应力与厂房围岩稳定

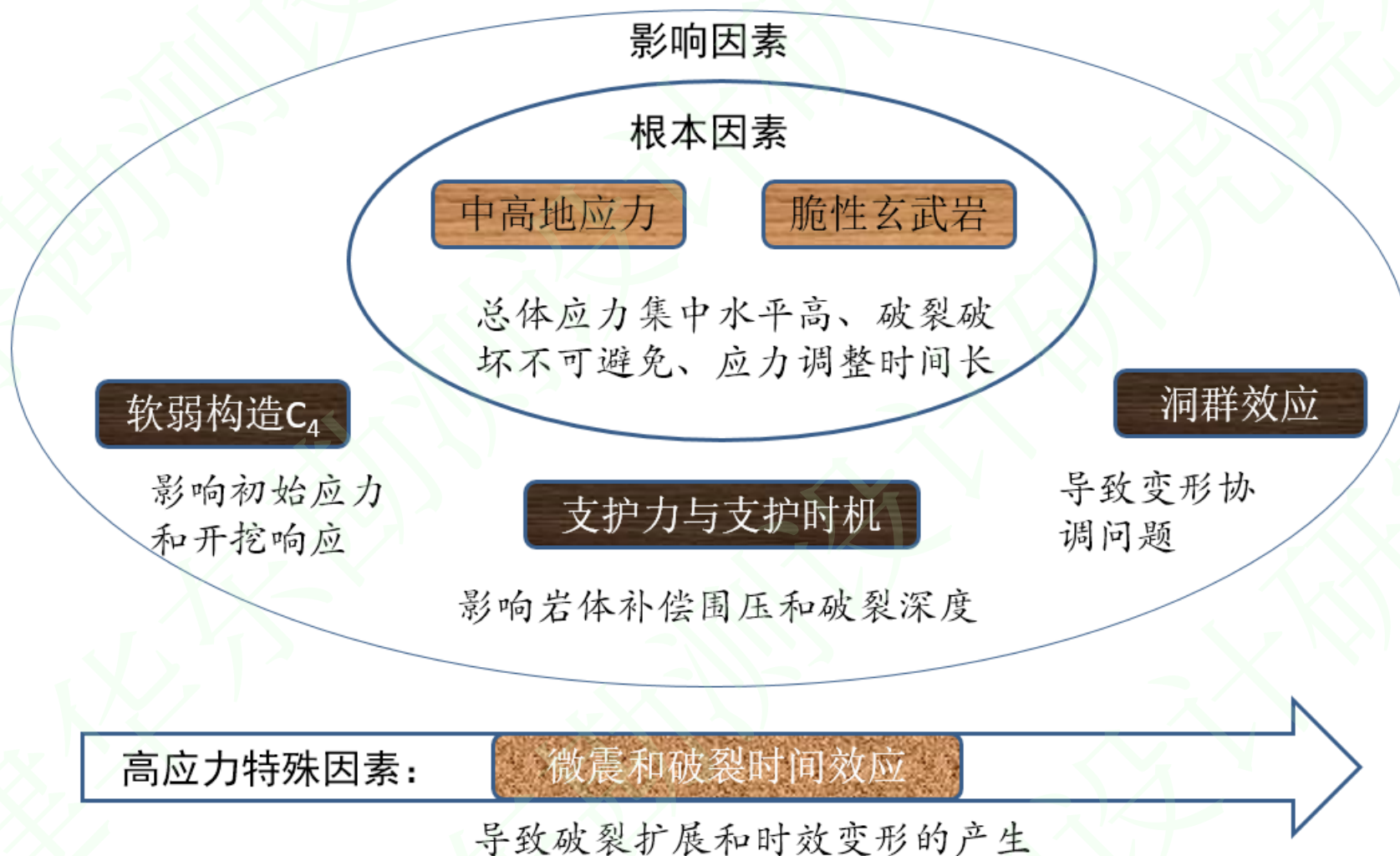


根据附近的厂顶锚固观测洞内锚索孔及专项勘探孔钻孔电视成果，孔内岩体整体完整，深部未发现岩体明显破裂及开裂现象

02 白鹤滩地下工程

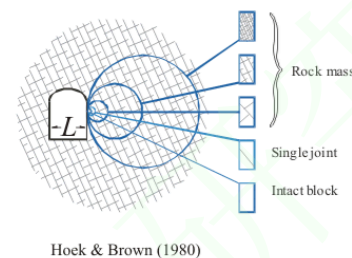
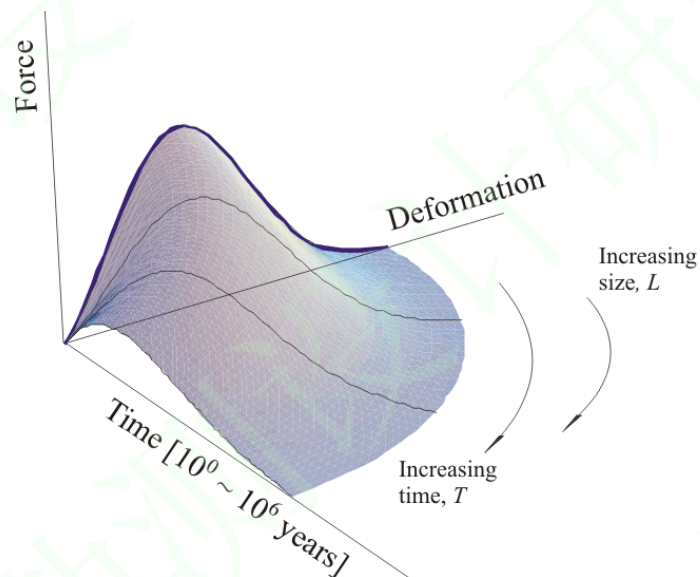
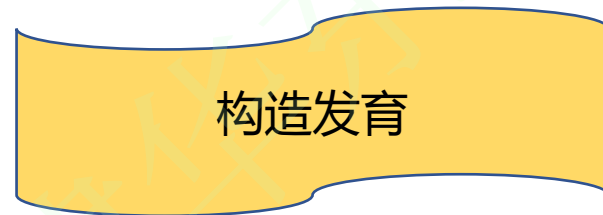
- (2) 错动带、高应力与厂房围岩稳定

对超常规变形模式的影响因素



02 白鹤滩地下工程

- (2) 错动带、高应力与厂房围岩稳定



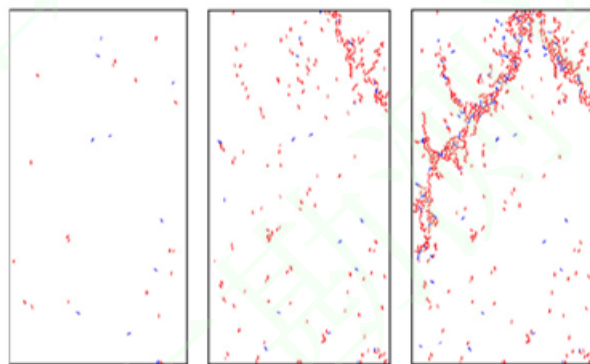
影响因素:

- 岩性;
- 应力集中程度。

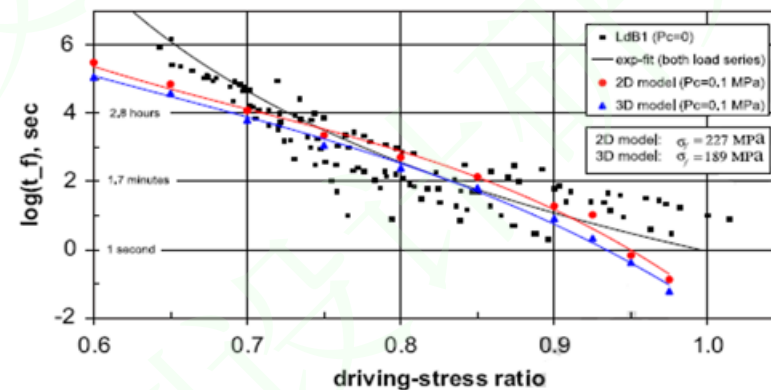
工程意义:

- 长期稳定性;
- 支护安全!

Strength of Rock Mass depends on two Scales: **Length** and **Time**



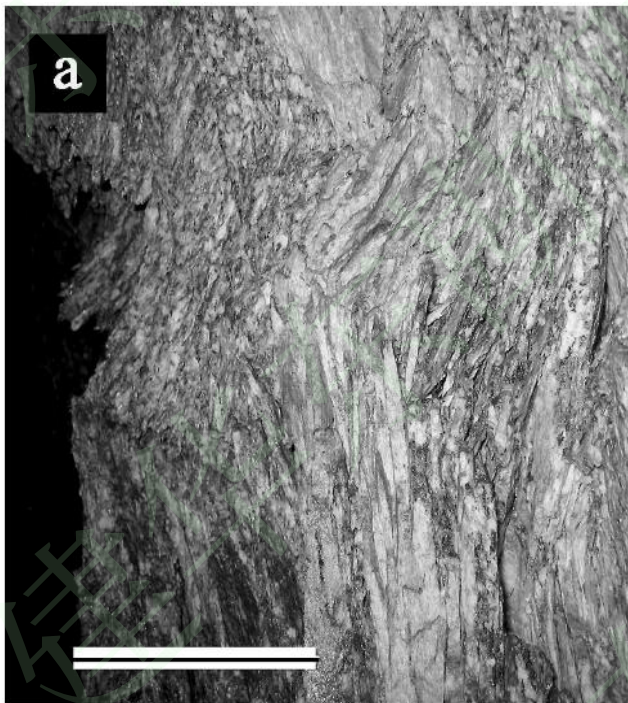
高应力条件下，破裂扩展



02 白鹤滩地下工程

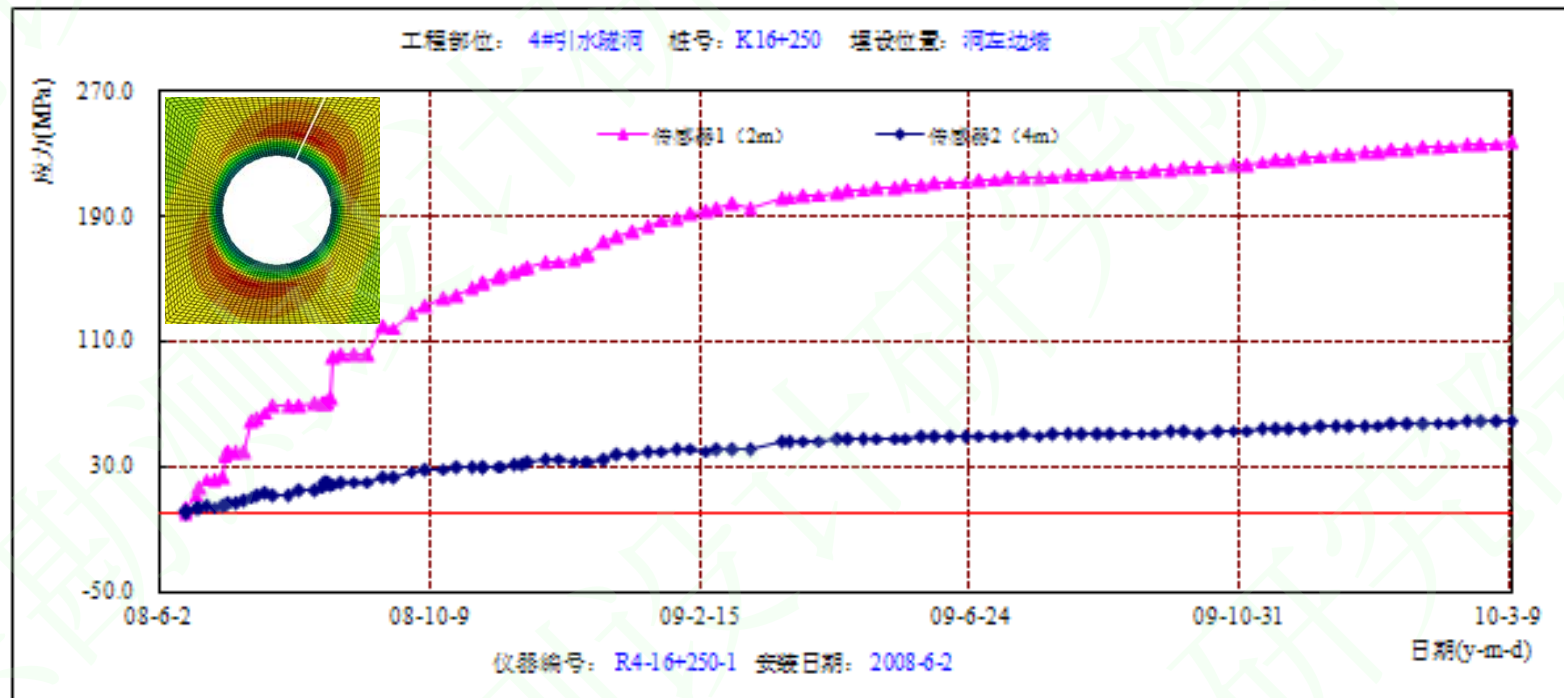
- (2) 错动带、高应力与厂房围岩稳定

概念: subcritical crack growth ([Time-dependent behavior of subcritical crack growth](#))



瑞典Furka隧道Bedretto施工支洞破裂发展时间效应

该施工支洞完成掘进以后的完整性良好，工程运行2年以后，围岩破裂现象十分严重。

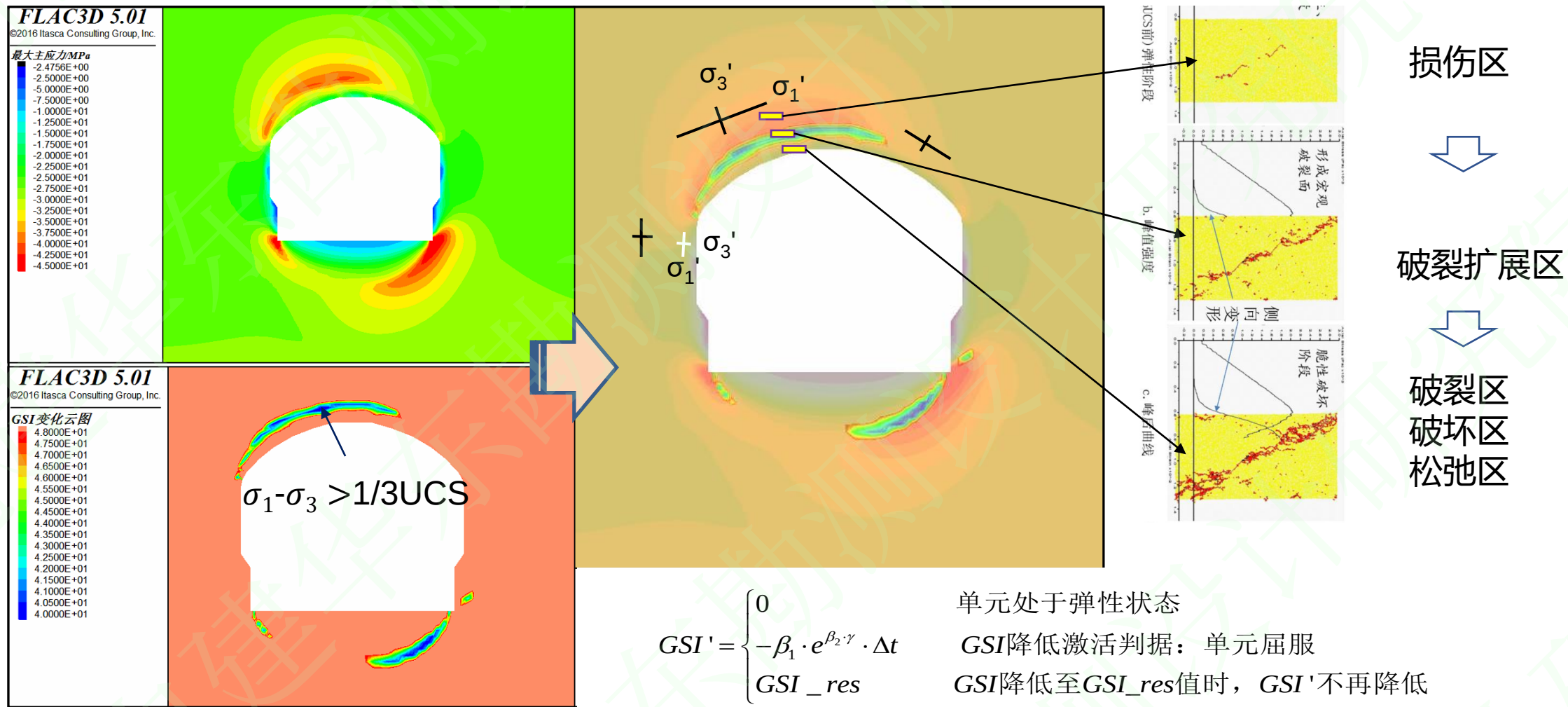


锦屏二级4#引水洞16+250断面北侧边墙锚杆应力历时曲线 (III类岩体)

锚杆应力增长经历了一个相对较长的过程 (2年)，如果锚杆受力是围岩破裂发展的结果没有开挖影响的情况下，围岩破裂发展会经历一个相当长的历程。

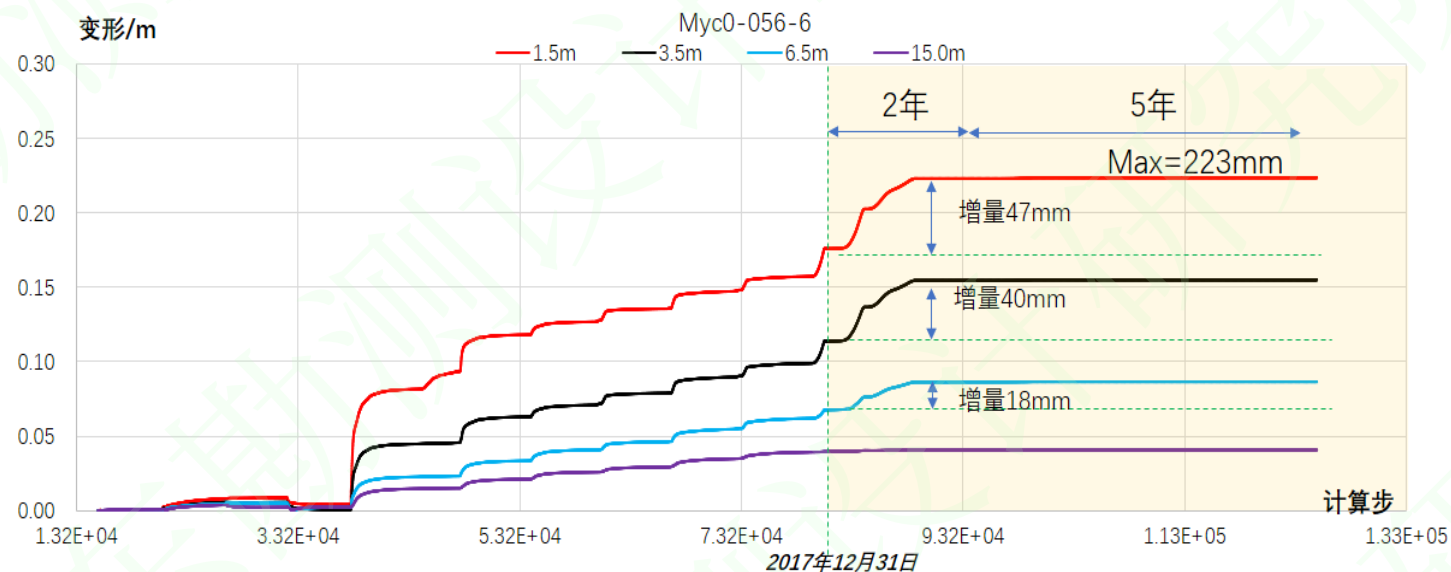
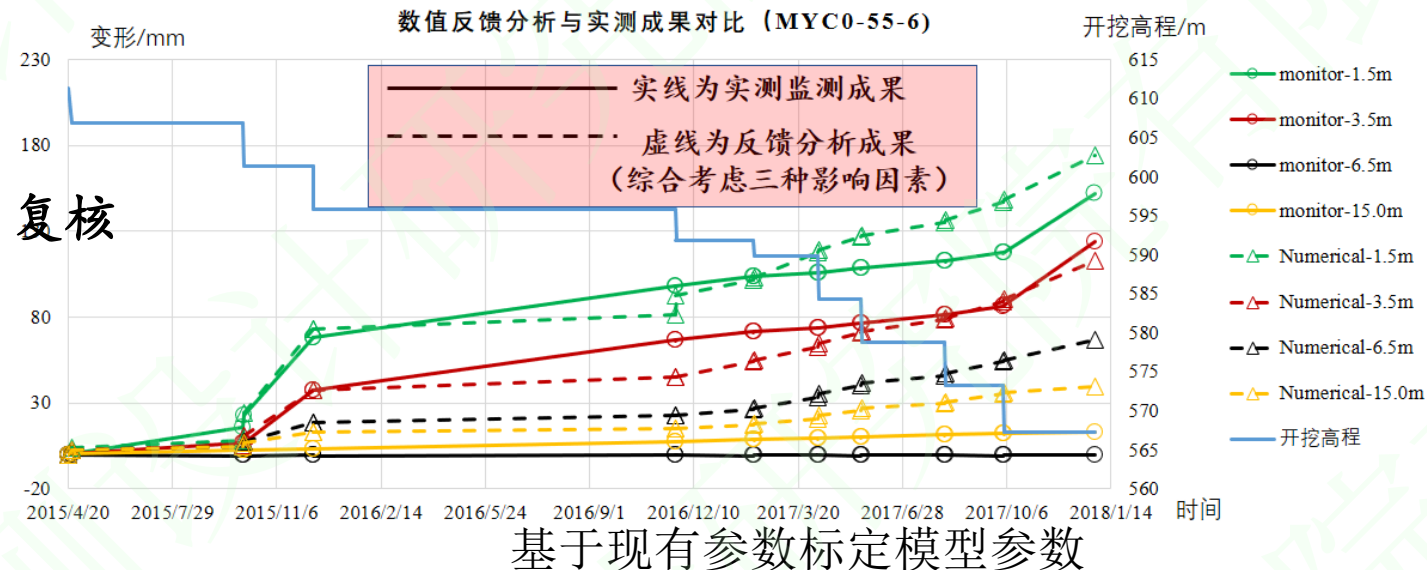
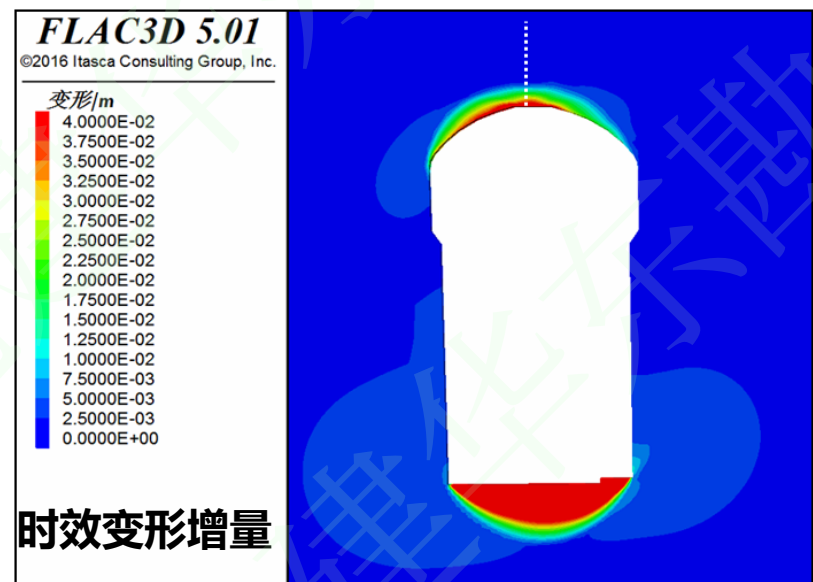
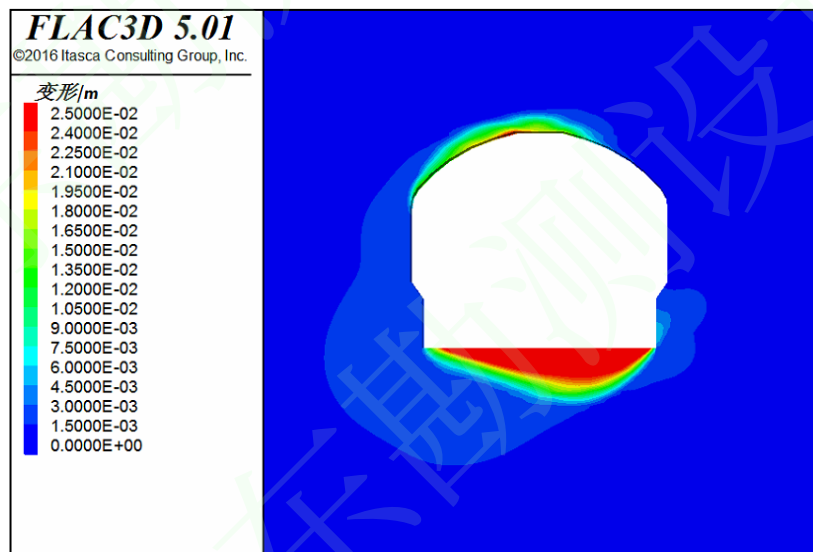
02 白鹤滩地下工程 - (2) 错动带、高应力与厂房围岩稳定

围岩破裂时间效应描述方法: 一种基于subcritical crack growth 理念的连续预测方法 (建立GSI降低与时间t的指数关系)



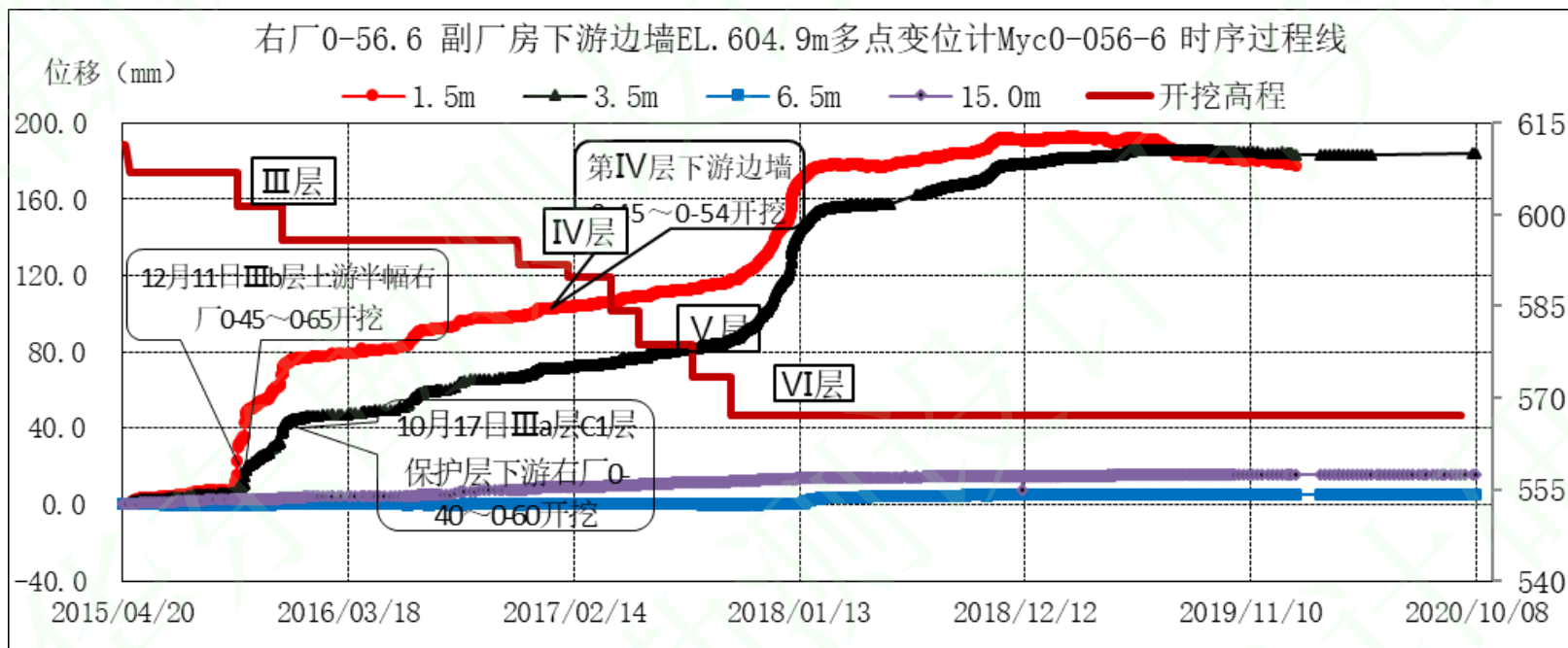
02 白鹤滩地下工程

- (2) 错动带、高应力与厂房围岩稳定



考虑时效特征条件下围岩变形数值预测成果(预测未来7年)

02 白鹤滩地下工程 - (2) 错动带、高应力与厂房围岩稳定



预测3.5m深度:

➤增量40-47mm;

➤2年基本收敛。

实测3.5m深度:

➤35 - 35mm;

➤18个月趋于收敛

日期	1.5m		3.5m		6.5m		15.0m	
	累计(mm)	增量(mm)	累计(mm)	增量(mm)	累计(mm)	增量(mm)	累计(mm)	增量(mm)
2017-12-31	156.55	0.00	128.92	0.00	-0.02	0.00	13.23	0.00
2019-05-19	192.30	35.75	185.55	56.63	4.93	4.95	15.55	2.32
2020-1-5	-	-	183.69	54.77	4.98	5.00	15.64	2.41
2020-10-5	无读数	-	184.17	55.25	4.87	4.89	15.78	2.55

03 | K项目地下工程

03 K项目地下工程 - 工程背景

地理位置

- 以色列北部
- 距离北部城市提比利亚市区26km
- 距离第二大城市特拉维夫140km
- 陆路交通便利



03 K项目地下工程

- 工程背景



装机：344MW (2台机组)

厂房：82.2m×18m×43m

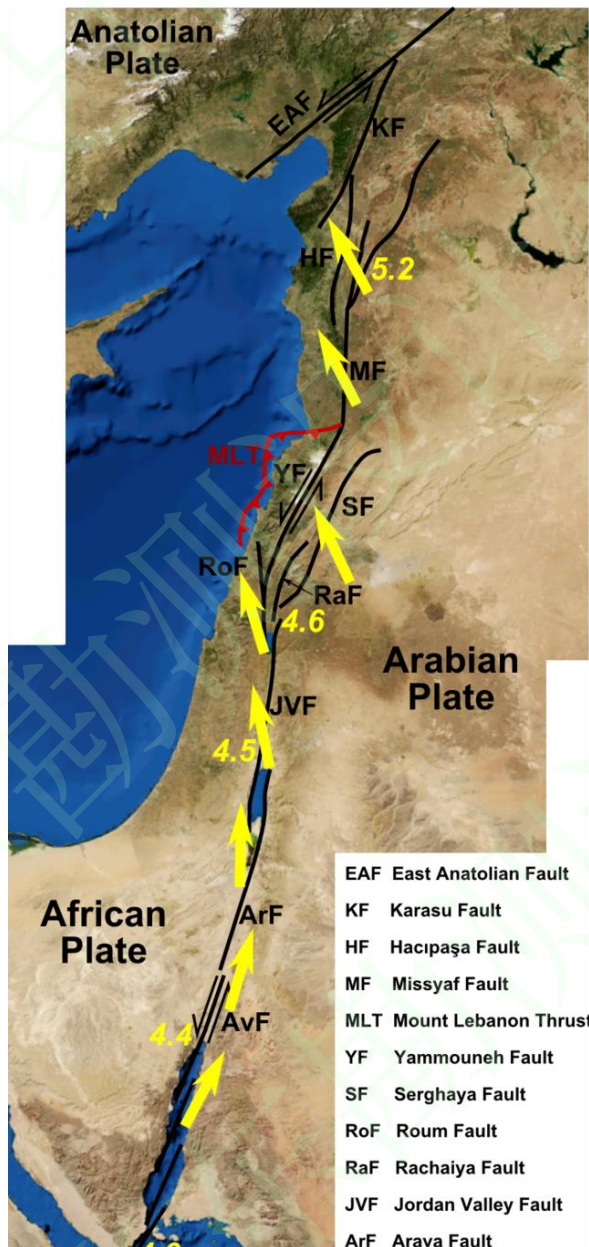
埋深: 390-470m

厂房和主变洞间距：35m

EPC项目

03 K项目地下工程

- 工程背景



基本地质条件

地处板块转换区域，为东非大裂谷延伸段

地震烈度高，基岩0.25g，上库0.37g，下库0.35g

年代新，构造活跃，区域地质构造十分复杂

岩石强度低，土体抗剪强度低

03 K项目地下工程

- 工程背景

岩性	围岩类别	单轴抗压强度 (MPa)	GSI
致密玄武岩	II	117.7	65
	III	101.3	55
气孔状玄武岩 杏仁状玄武岩	III	50.81	50
	IV	33.90	40
	V	16.60	35
火山碎屑岩	III	12.28	50
	IV	8.80	35
	V	5.30	20
含绿脱石玄武岩	III	13.00	50
	IV	8.90	40
	V	5.50	35

输水发电系统

主要为火山碎屑岩与玄武岩互层发育

地下厂房边墙顶拱预计部分出露含绿脱石玄武岩，边墙出露IV类气孔状玄武岩，厂房洞室群设计施工极具挑战

地下洞室群存在软岩挤压变形风险

03 K项目地下工程

- 主要技术难点

设计关键技术

- 引水上平洞土洞、尾水土洞开挖支护设计与施工
 - 要求采用新意法
- 高震区土坝抗震设计
- 复杂地质条件下厂房洞室群开挖支护设计与施工

03 K项目地下工程

- 设计审批流程与特点

设计审批特点

内部会签

- 及时、有效
- 痕迹化管理到位

OE审批

- 重计算、轻经验
- 过度强调安全，缺进度和经济统筹

设计审批难点

中国规范—NO

只认欧美规范、英文文献

工程类比—NO

质疑类比工程的真实性

没有计算—NO

人力资源投入大

业主专业管理经验少

完全依赖OE

- 中方设计施工技术优势无法有效发挥

- 业主及OE将设计审批作为手段影响设计施工方案

03 K项目地下工程 - (1) 地应力问题

ISRM Suggested Methods for rock stress estimation—Part 1: Strategy for rock stress estimation☆

J.A. Hudson^{a,*}, F.H. Cornet^b, R. Christiansson^c

^aISRM Commission on Testing Methods, Imperial College and Rock Engineering Consultants, 7 The Quadrangle, Welwyn Garden City, AL8 6SG, UK

^bLaboratoire de Mécanique des Roches, Institut de Physique du Globe de Paris, 4 Place Jussieu, 75252, Paris Cedex 05, France

^cSKB, Stockholm, Sweden

Accepted 20 July 2003

Recommend method:

- Hydraulic Fracturing
- Hydraulic Testing of Pre-existing Fractures (HTPF)
- Overcoring methods

Other method:

- Hydro Jacking
- Plate Jacking
- ...

03 K项目地下工程 - (1) 地应力问题

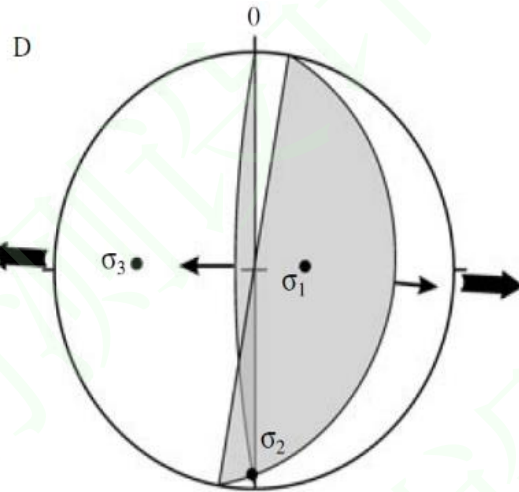
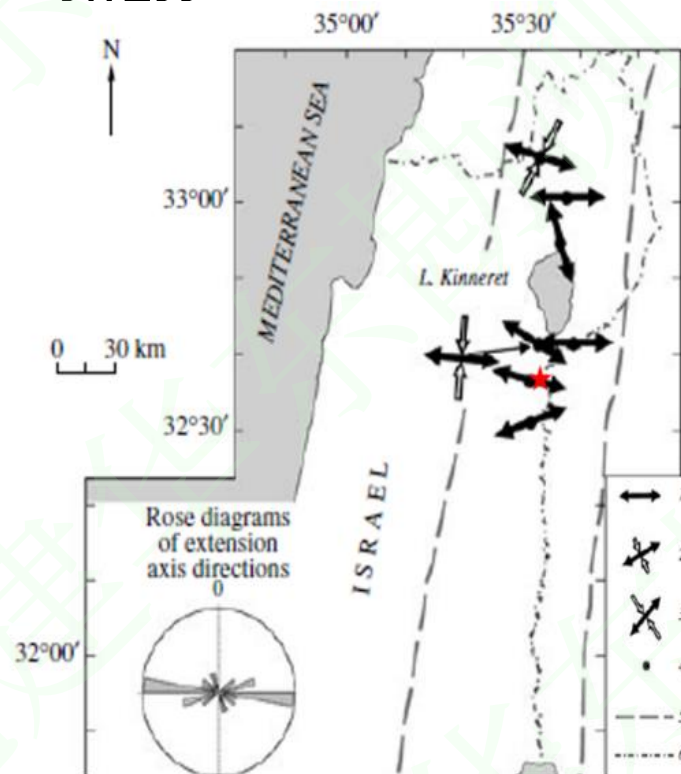
In situ stress assessment strategy:

- Use the pre-existing reference near project site
 - Other project' s in-situ stress measurement data
 - Geology analysis on the stress regime
 - World stress map – stress regime, SH direction
- Justify if vertical direction is a principal stress direction? Estimate the vertical stress component magnitude
- Establish the SH stress orientation (HF, or evaluate by borehole breakout, high stress failure location)
- Establish complete stress tensor (HF, HTPF, Overcoring)
- Establish variation

03 K项目地下工程

- (1) 地应力问题

Geology analysis on in-situ stress



(1) The Dead Sea rift corresponds neither to the typical strike-slip fault not to the pure rift but is most likely a result of oblique extension.

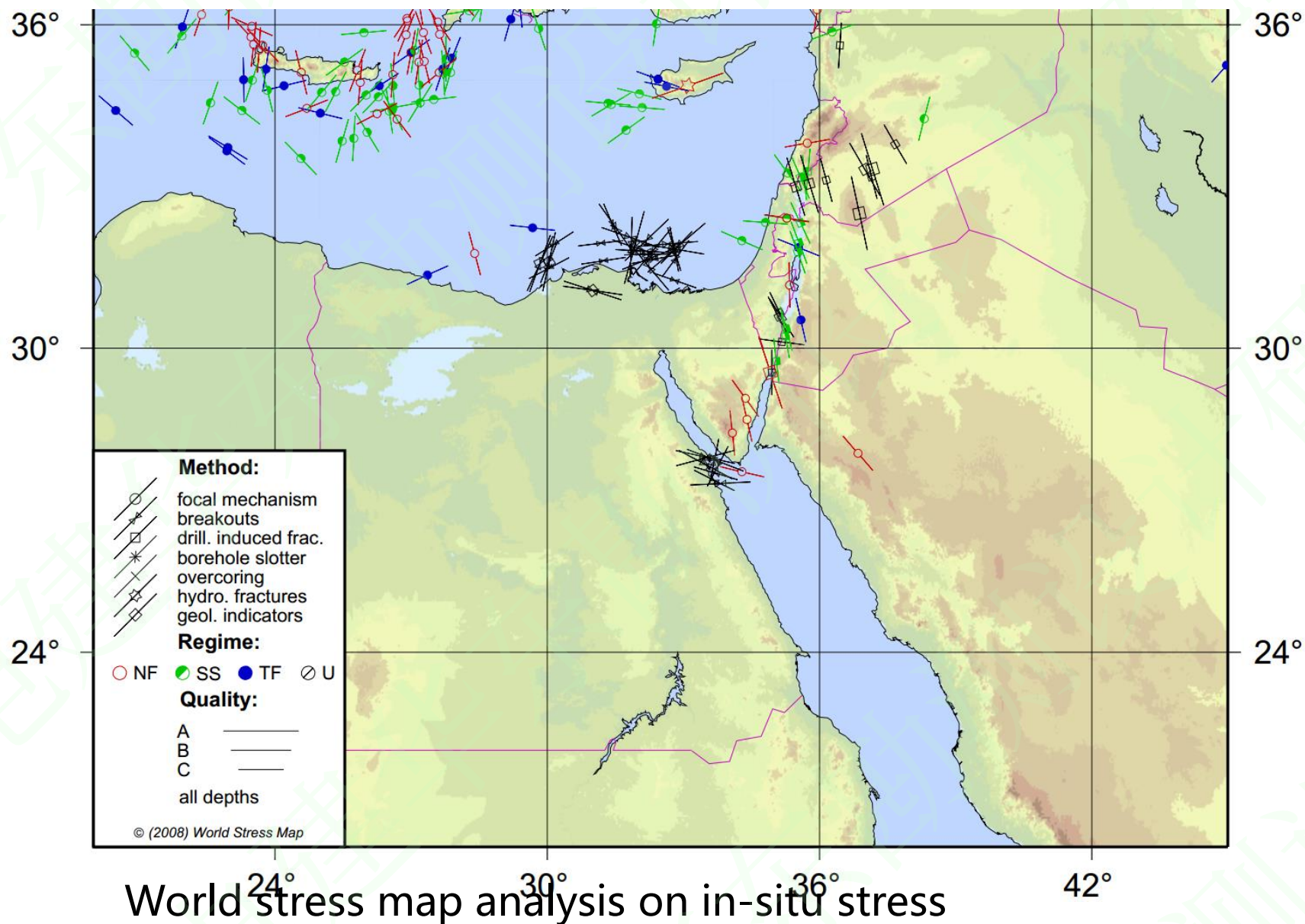
(2) As a result, the two prevalent types of stress field develop at a local level:

- (1) roughly latitudinal extension and
- (2) a shear with NE-SW orientation of the ex-tension axis and NW-SE orientation of the compression axis.

Zoback (1992) thought the stress regime is $S_v > S_{Hmax} > S_h$,

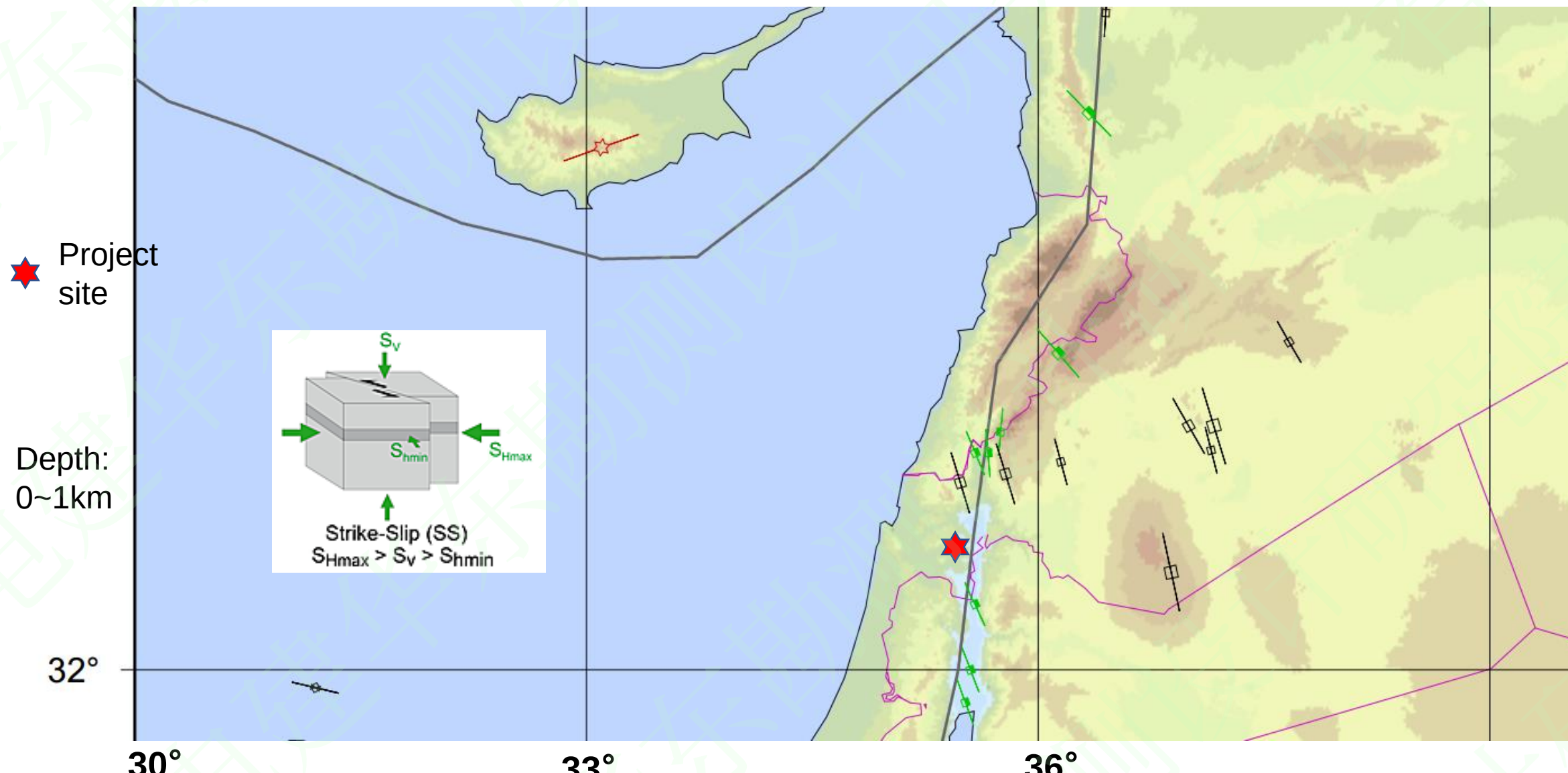
03 K项目地下工程

- (1) 地应力问题



03 K项目地下工程 - (1) 地应力问题

Stress map displays the orientation of maximum horizontal compressional stress S_H



03 K项目地下工程

- (1) 地应力问题

SH: NE5°~NW17°

Sv: Vertical

Quality

A ——— S_{Hmax} is within $\pm 15^\circ$

B ——— S_{Hmax} is within $\pm 20^\circ$

C ——— S_{Hmax} is within $\pm 25^\circ$



Data Quality: B and C, then range of SH could be as follow

SH: NE25°~NW37°

Sv: Vertical

Chose the most conservative scenario for PH complex:

SH : NW 37° ,

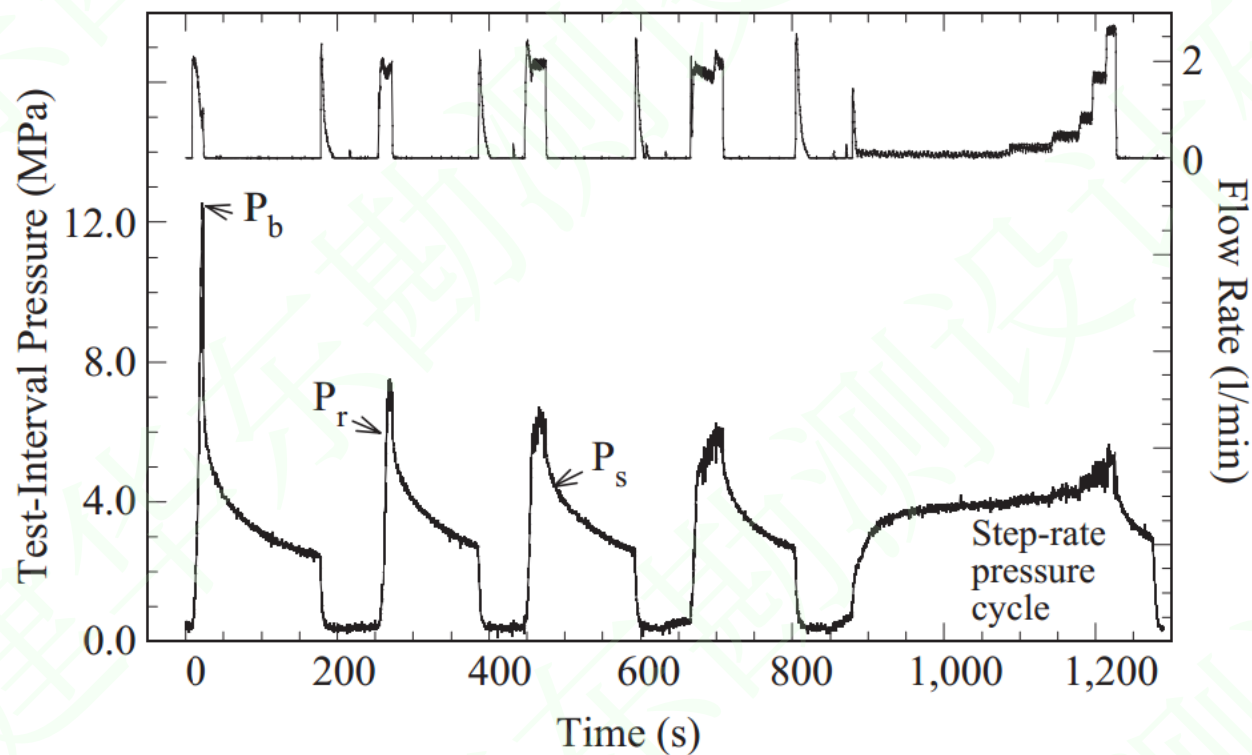
Sh : NE 53° ,

SV: Vertical,

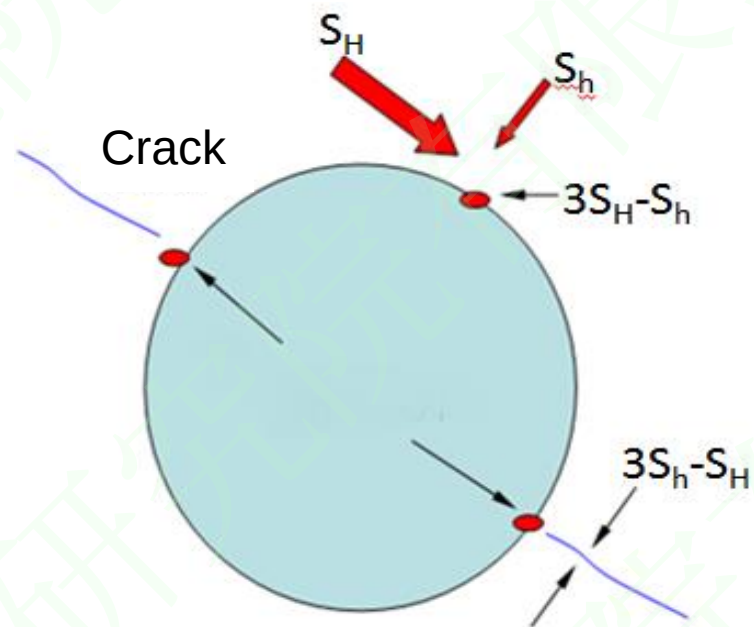
03 K项目地下工程

- (1) 地应力问题

Hydraulic Fracturing Test

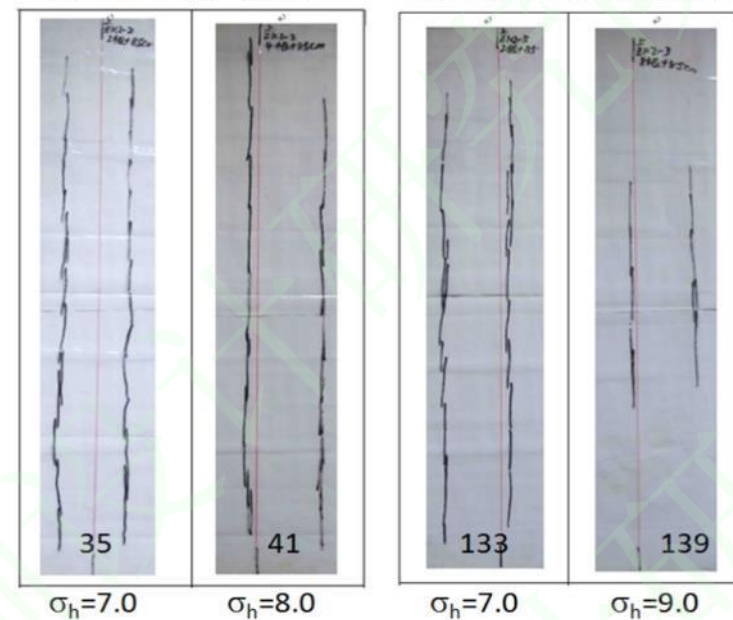


$$\begin{cases} S_H = 3P_s - P_b + T - P_0 \\ S_H = 3P_s - P_r - P_0 (?) \\ S_h = P_s \end{cases}$$



ZK2-2水平孔, 方位E-W

ZK2-3水平孔, 方位N10W



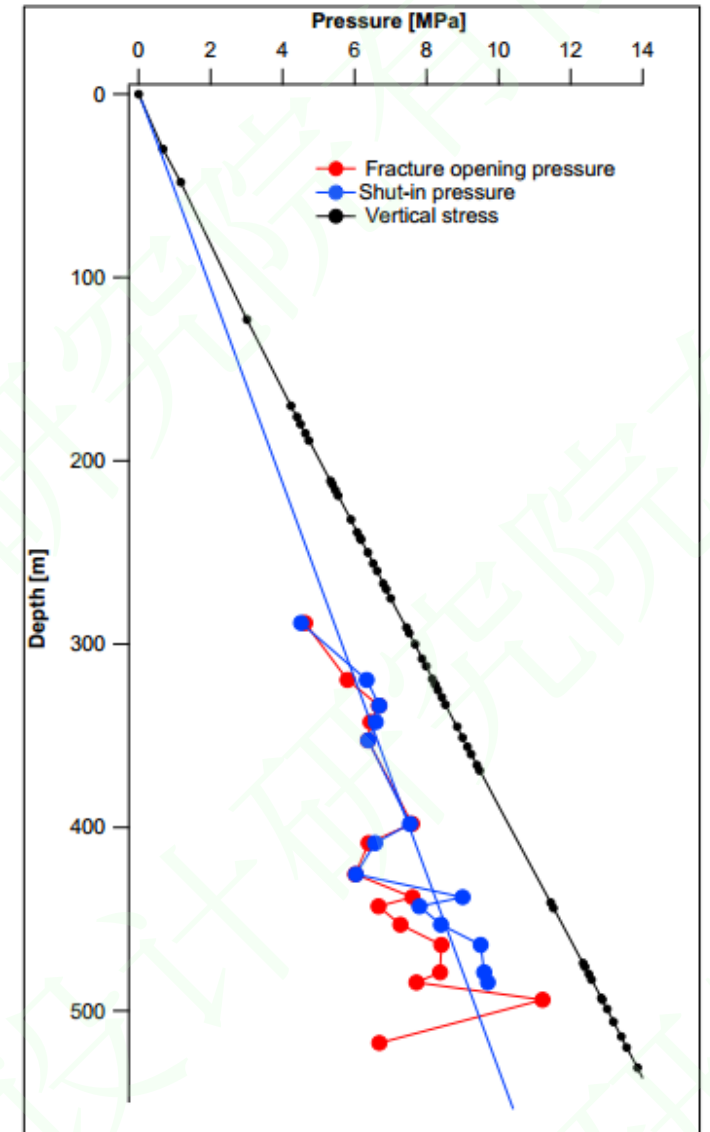
03 K项目地下工程 - (1) 地应力问题

Hydro Jacking Test

- Suitable for fractured rock masses
- determine the minimum stress
- To estimate the rock stress in situ in fractured formation where hydraulic fracturing cannot be applied

Table 1: Fracture opening pressure and shut-in pressure

Depth (m)	Opening Pressure (MPa)	Shut-in Pressure (MPa)
288.5	4.6	4.5
319.5	5.8	6.3
333.5	6.7	6.6
342.5	6.4	6.6
352.5	6.4	6.4
398	7.6	7.5
408.5	6.4	6.6
425.5	6.0	6.0
438	7.6	9.0
443	6.7	7.8
453	7.3	8.4
464	8.4	9.5
479	8.4	9.7
484.5	7.7	9.3
494	11.2	-
517.5	6.7	6.4



03 K项目地下工程 - (1) 地应力问题

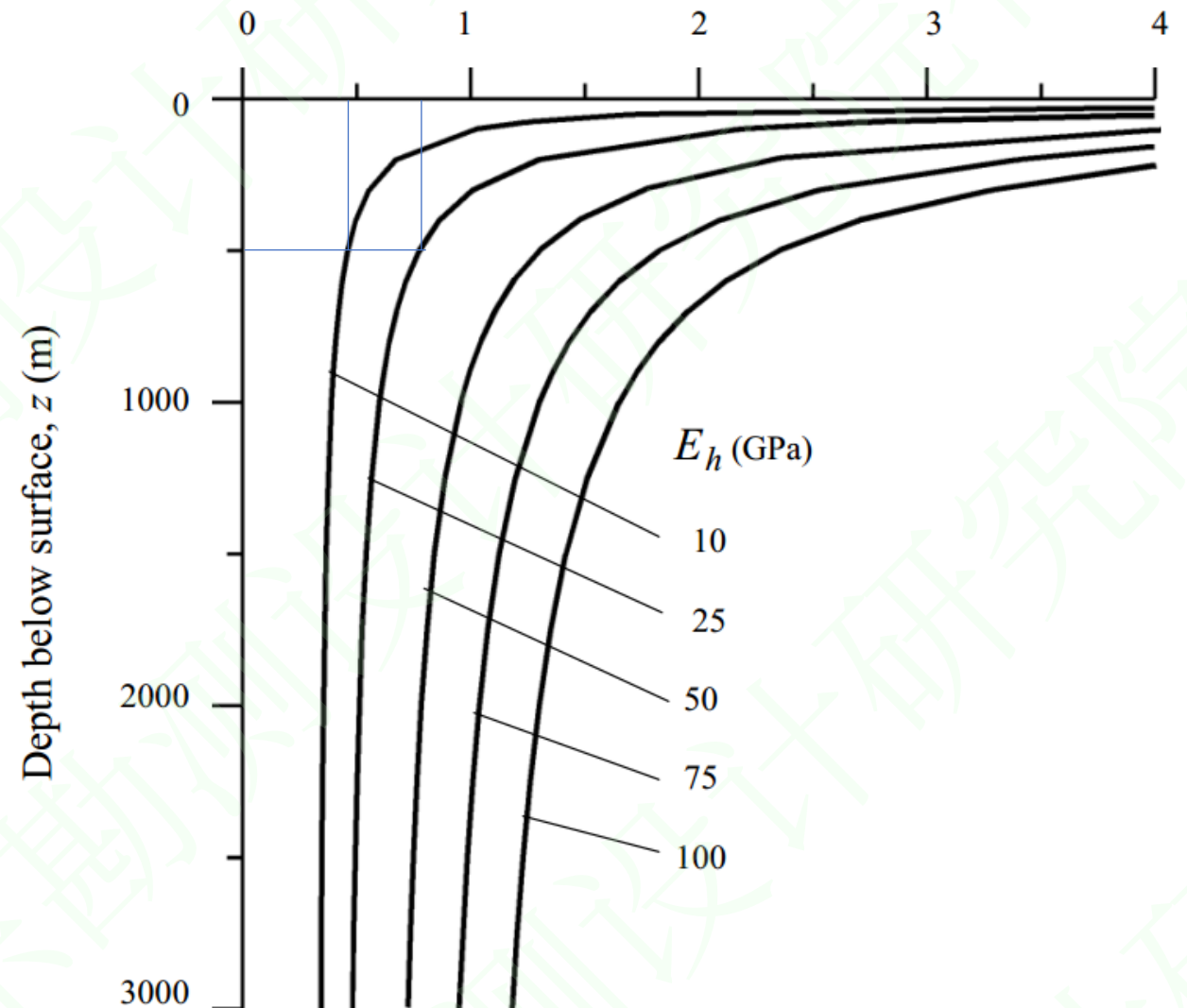
Assess of SH – (1) empirical equation- **not reliable**

$$k = 0.25 + 7E_h \left(0.001 + \frac{1}{z} \right)$$

E_h – average deformation modulus of above rock mass in horizontal direction
 z - depth

No.	Cover depth /m	lithology	rock mass	Em /GPa
10	415.8	bs-strong	II	23.71
11	424.6	bs-strong	III	13.34
12	434.8	bs-weak	III	7.13
13	447.6	bs-weak	IV	3.15
14	454.5	bs-weak	III	7.13
15	461.1	bs-weak	IV	3.15
16	500.0	bs-weak	III	7.13
17	550	bs-weak	III	7.13

Can't explain measure results $K=0.71$



03 K项目地下工程

- (1) 地应力问题

Assess of SH – (1) empirical equation – too larger range to use

$$\frac{100}{H} + 0.3 \leq \frac{\sigma_H + \sigma_h}{2\sigma_v} \leq \frac{1500}{H} + 0.5$$

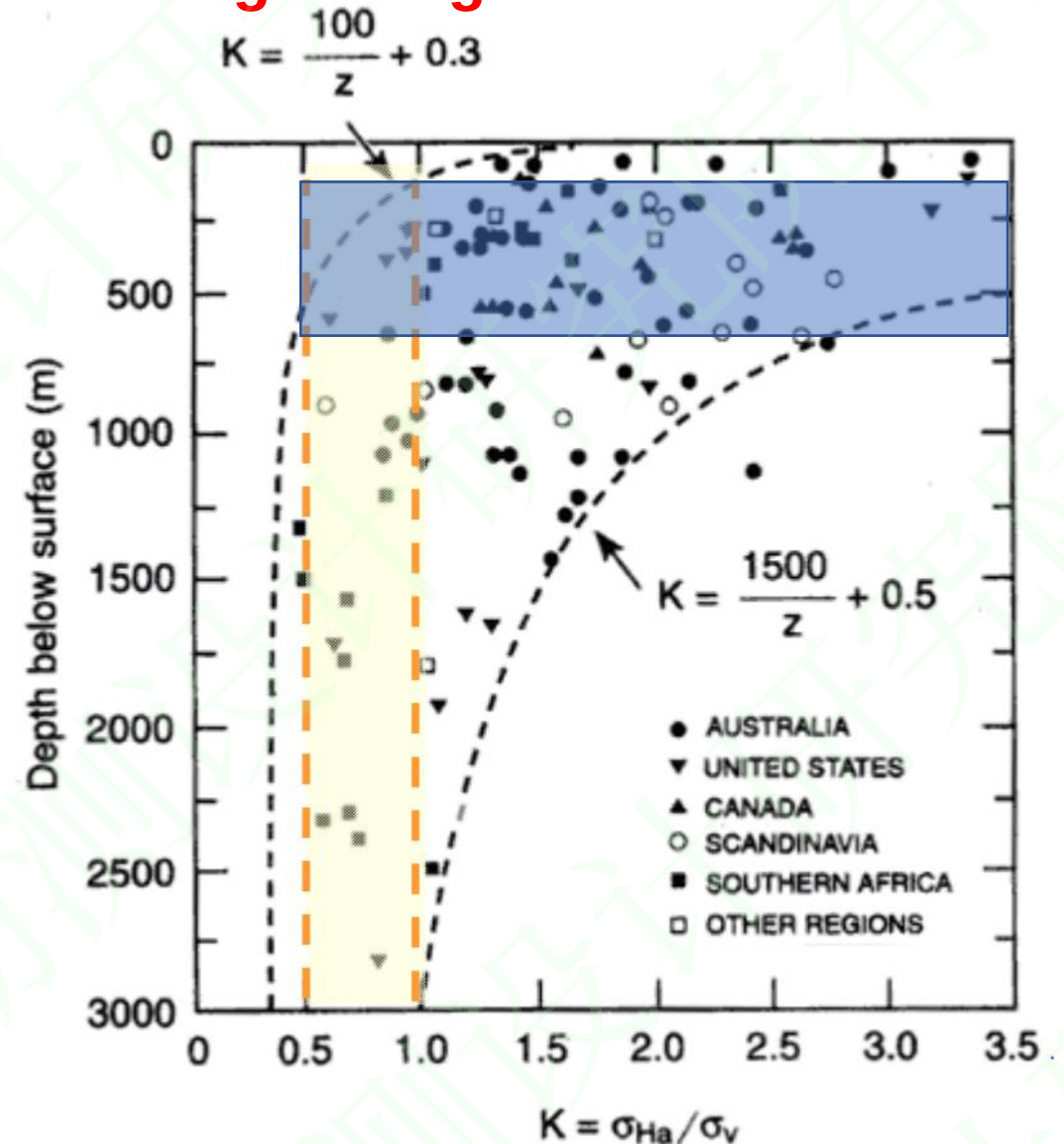
σ_H : maximum horizontal stress

σ_h : minimum horizontal stress

H: depth / m.

$$0.3 < \sigma_H < 6.3$$

The formula has less reference value
when overburden less than 1000m



03 K项目地下工程

- (1) 地应力问题

Assess of SH – (2) using HF equation - **not common accepted, but no other choice**

The linear relationship of minimum principal stress and depth was estimated with a straight line fit with and anchored to a value of 0 at the surface. The procedure was also applied to the fracture opening pressure. This results in:

$$S_H = 3P_s - P_r - P_0$$

Shut-in pressure = $S_{\min}$: 0.0186 (where z is the depth in m; $S_{\min}$ in MPa)

Fracture opening pressure (P_0): 0.0171 (where z is the depth in m; P_0 in MPa)

Table 1: Fracture opening pressure and shut-in pressure

Depth (m)	Opening Pressure (MPa)	Shut-in Pressure (MPa)
288.5	4.6	4.5
319.5	5.8	6.3
333.5	6.7	6.6
342.5	6.4	6.6
352.5	6.4	6.4
398	7.6	7.5
408.5	6.4	6.6
425.5	6.0	6.0
438	7.6	9.0
443	6.7	7.8
453	7.3	8.4
464	8.4	9.5
479	8.4	9.7
484.5	7.7	9.3
494	11.2	-
517.5	6.7	6.4

$$S_H = 3P_s - P_r - P_0 = 3 * 0.0186 - 0.171 = 0.0387$$

$$K_h = S_h / S_v = 0.0186 / 0.0261 = \mathbf{0.71} \ (\approx \mathbf{0.7})$$

$$K_H = S_H / S_v = 0.0387 / 0.0261 = \mathbf{1.48} \ (\approx \mathbf{1.5})$$

03 K项目地下工程

- (1) 地应力问题

2. Geological model, **In-situ Stress** and rock mass property

Assess of SH – Summary

S_H Direction:
Most likely: NE5°~NW17°
Largest Deviation: NE25°~NW37°

S_H Magnitude:
Most likely: 1.3
Largest Deviation: 1.0~1.5

Suggestion for calculation: typical situation

S_H Direction: NW17°
 S_H Magnitude: $1.3S_V$

Suggestion for calculation: most conservative scenario

S_H Direction: NW37°
 S_H Magnitude: $1.5S_V$

03 K项目地下工程

- (2) 临界稳定问题

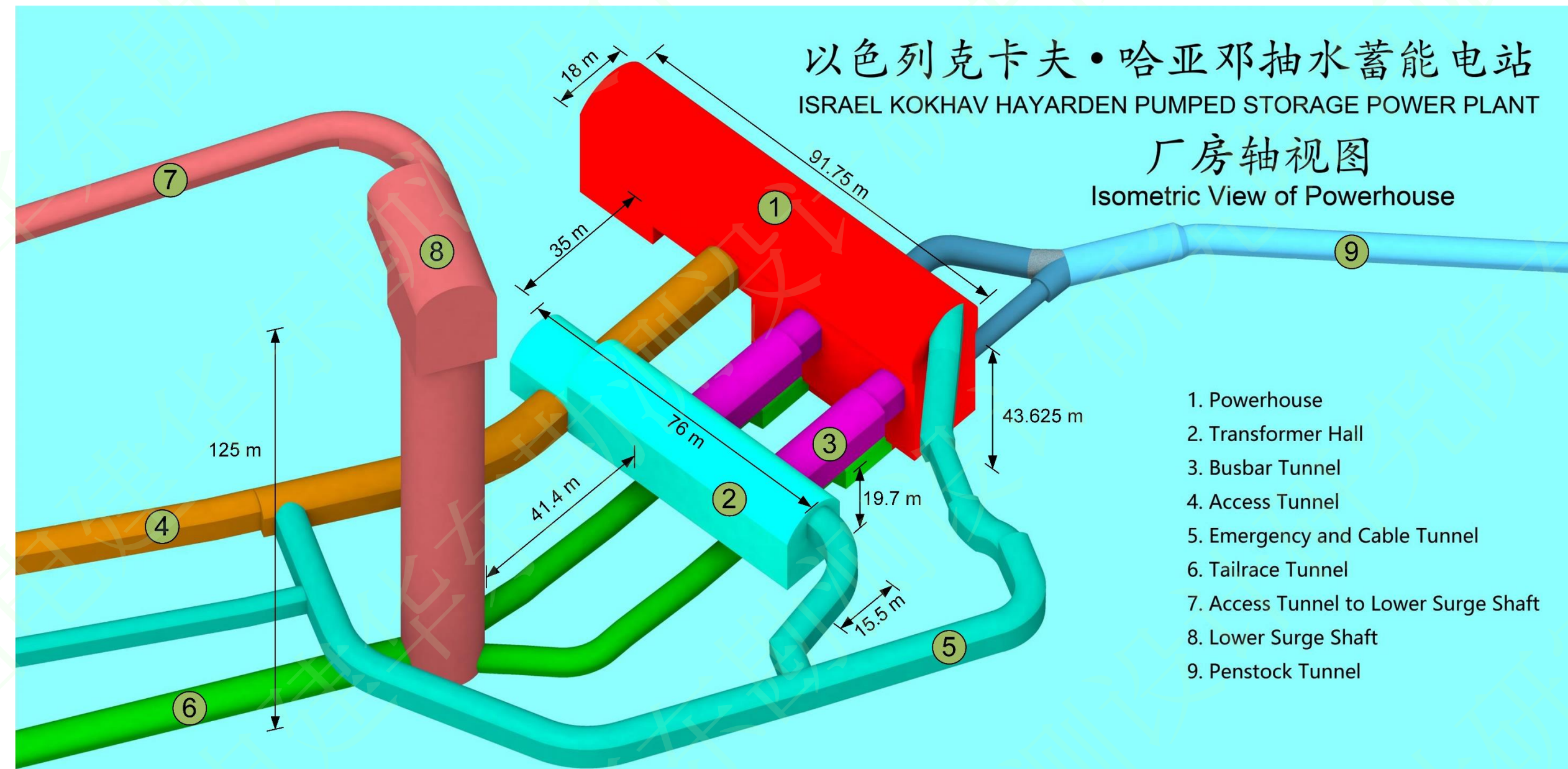
以色列克卡夫·哈亚邓抽水蓄能电站

ISRAEL KOKHAV HAYARDEN PUMPED STORAGE POWER PLANT

厂房轴视图

Isometric View of Powerhouse

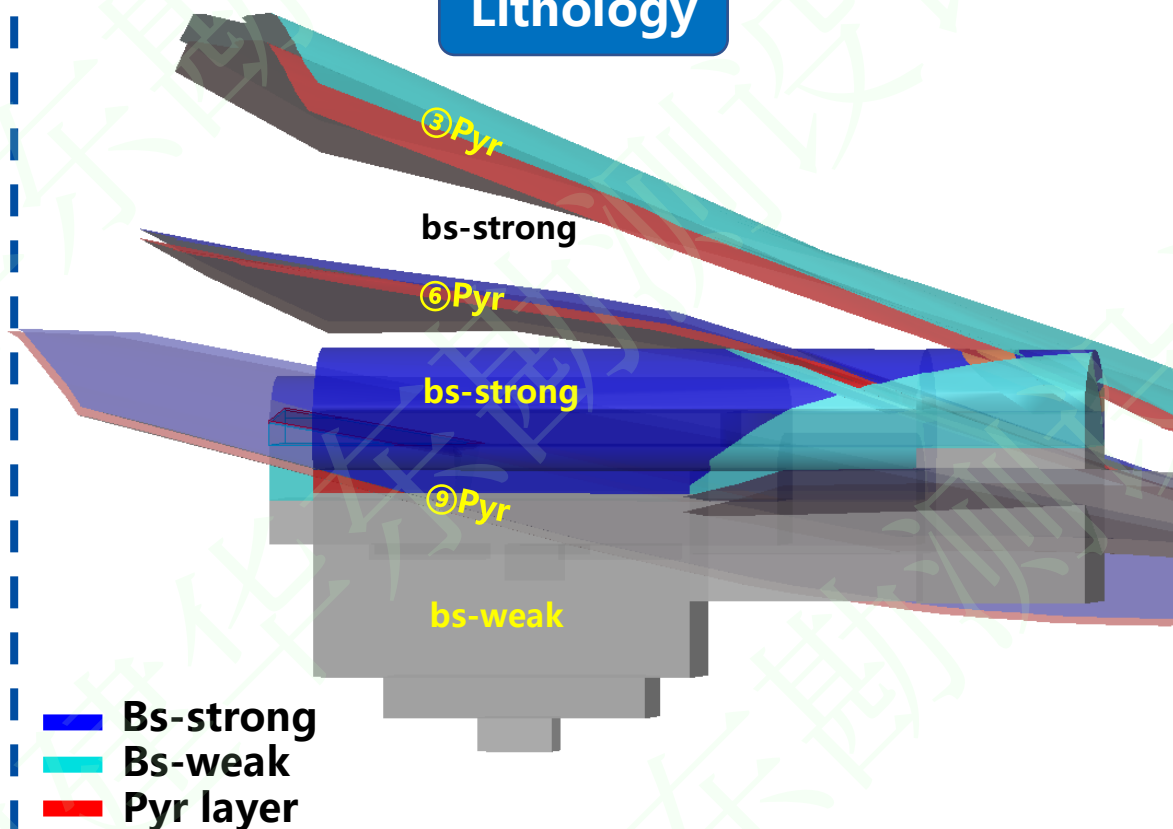
- 1. Powerhouse
- 2. Transformer Hall
- 3. Busbar Tunnel
- 4. Access Tunnel
- 5. Emergency and Cable Tunnel
- 6. Tailrace Tunnel
- 7. Access Tunnel to Lower Surge Shaft
- 8. Lower Surge Shaft
- 9. Penstock Tunnel



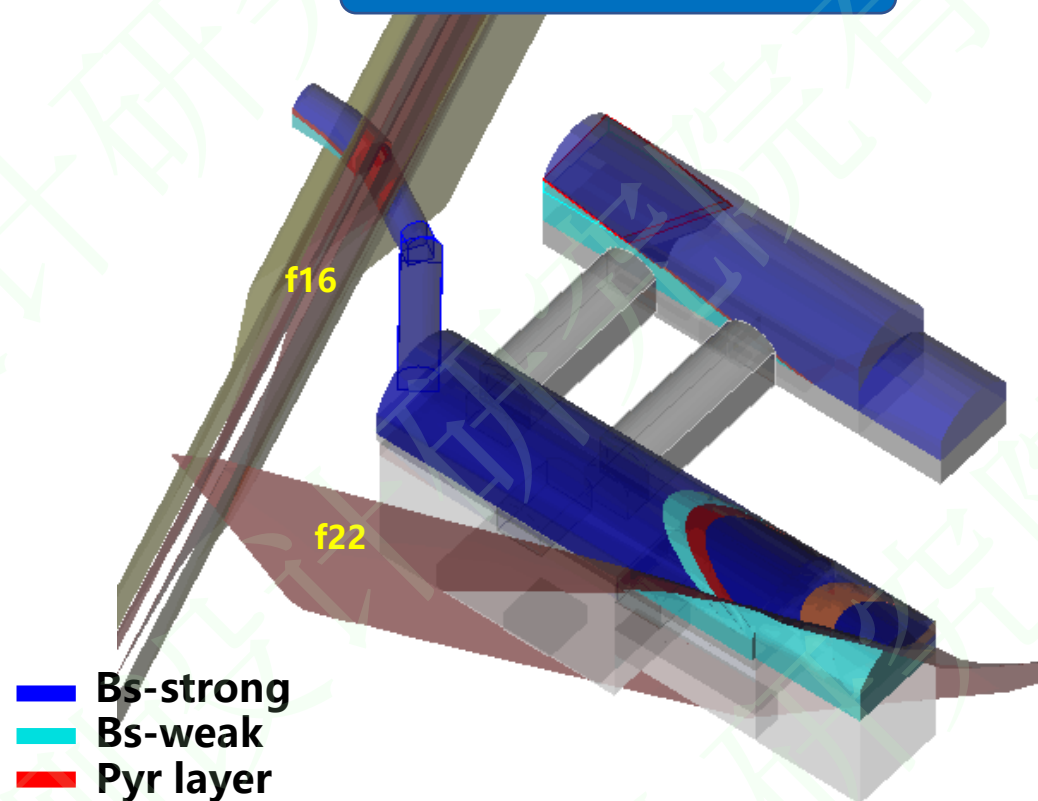
03 K项目地下工程

- (2) 临界稳定问题

Lithology



Geological structure



- Main rock mass lithology : ③, ⑥, ⑨ Pyr layers, bs-strong, and bs-weak.
- Main geological structure : f16 fault , f22 fault.

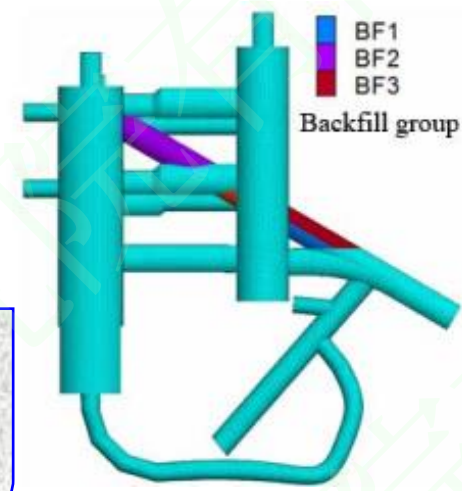
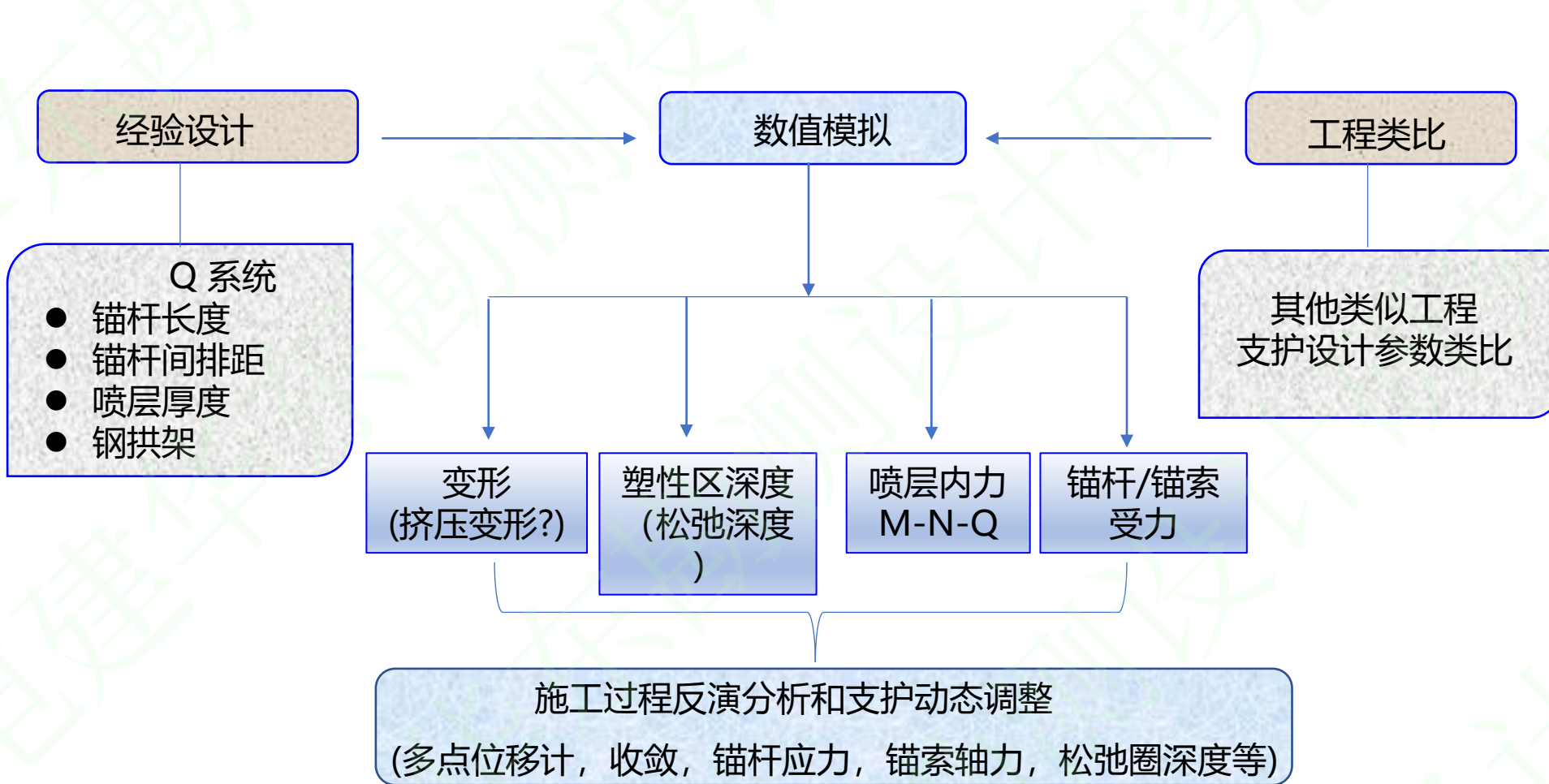
03 K项目地下工程

- (2) 临界稳定问题



03 K项目地下工程

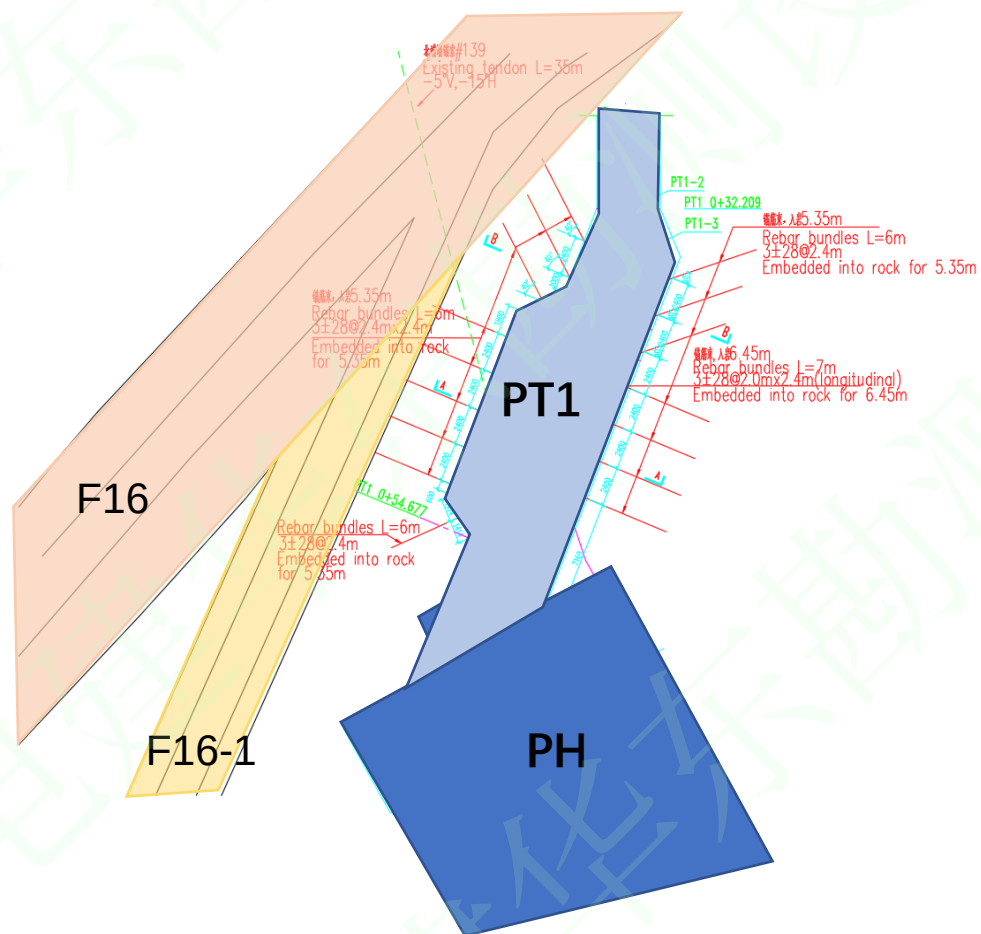
- (3) 设计方法



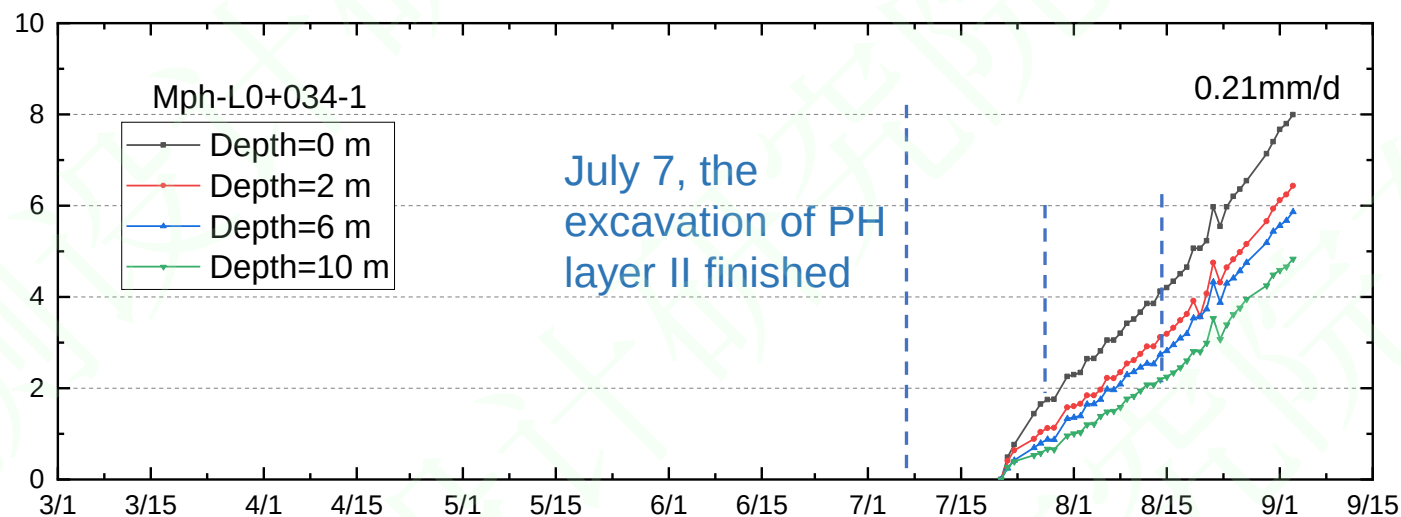
洞室群计算模型



- (5) 北端墙局部围岩稳定



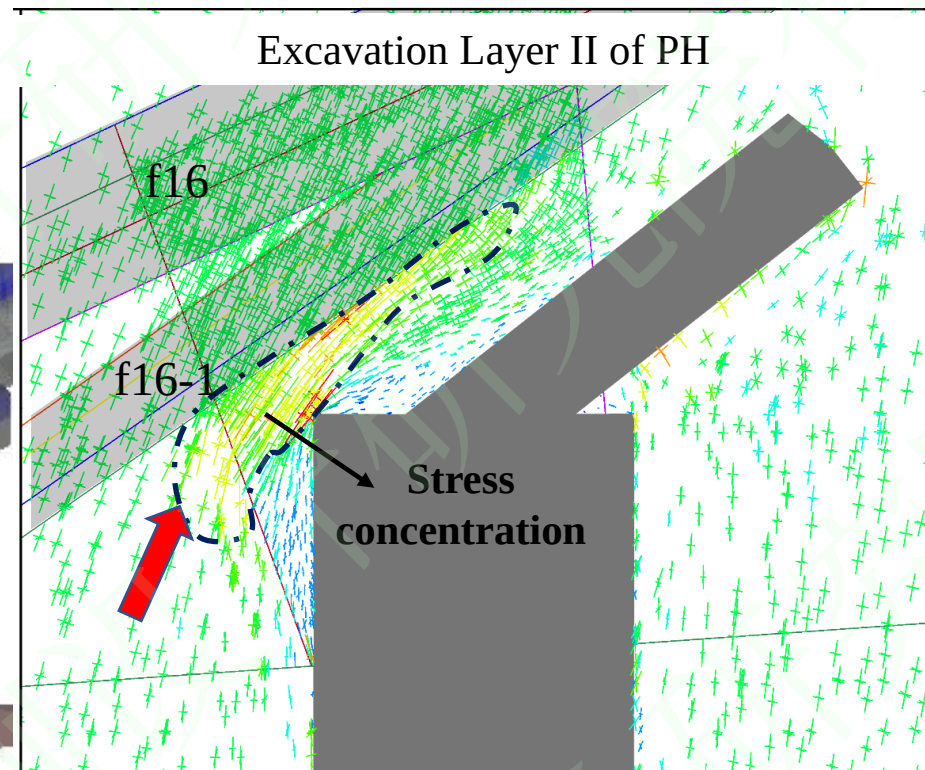
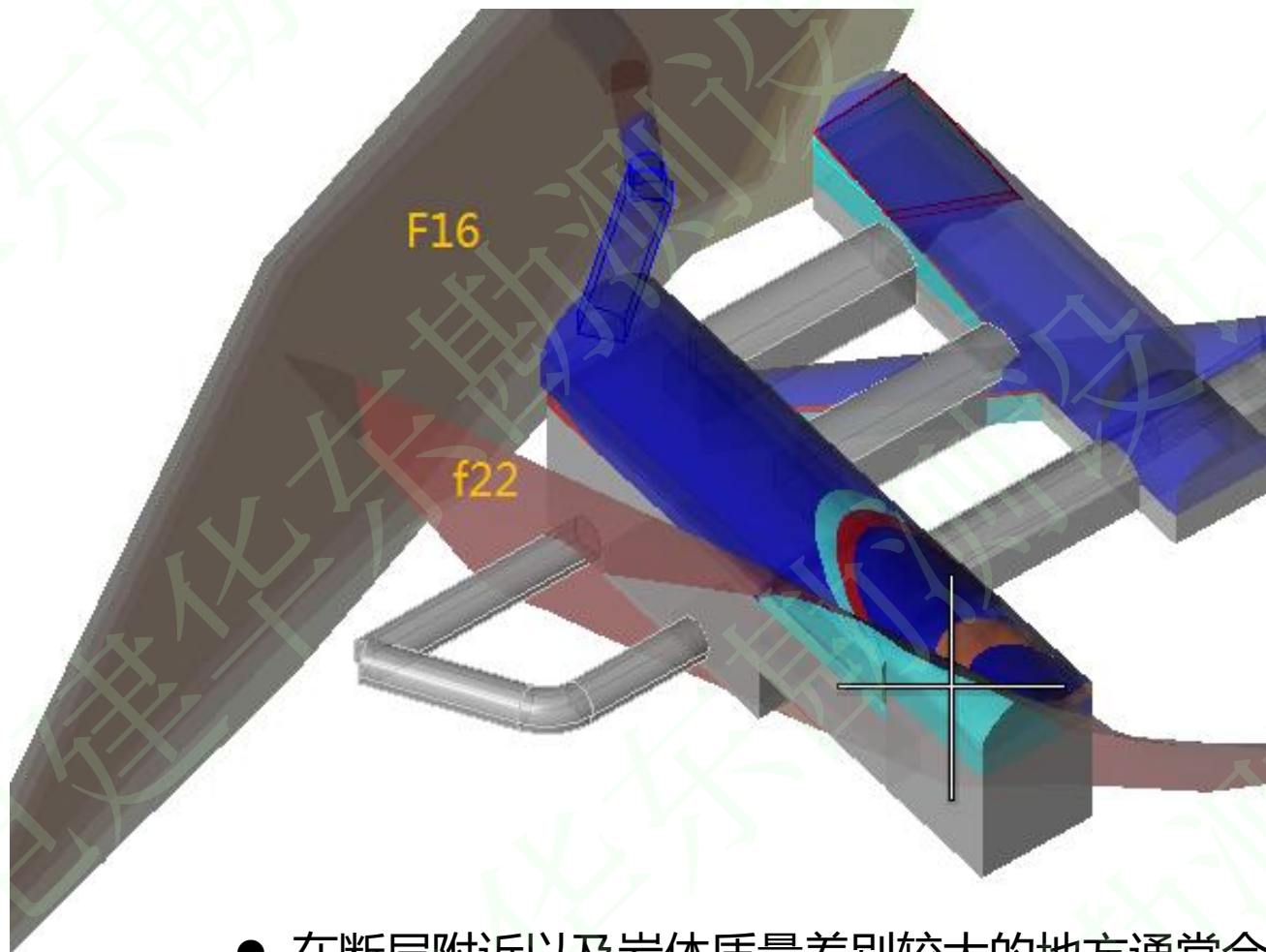
Plan view



- July 07, 2019, PH layer II excavation finished,
- July 21, 2019, the extensometer of Mph-L0+034-1 was installed.
- No excavation, deformation continue increase
- **The deformation is not only near the excavation surface, but also in the deep.**

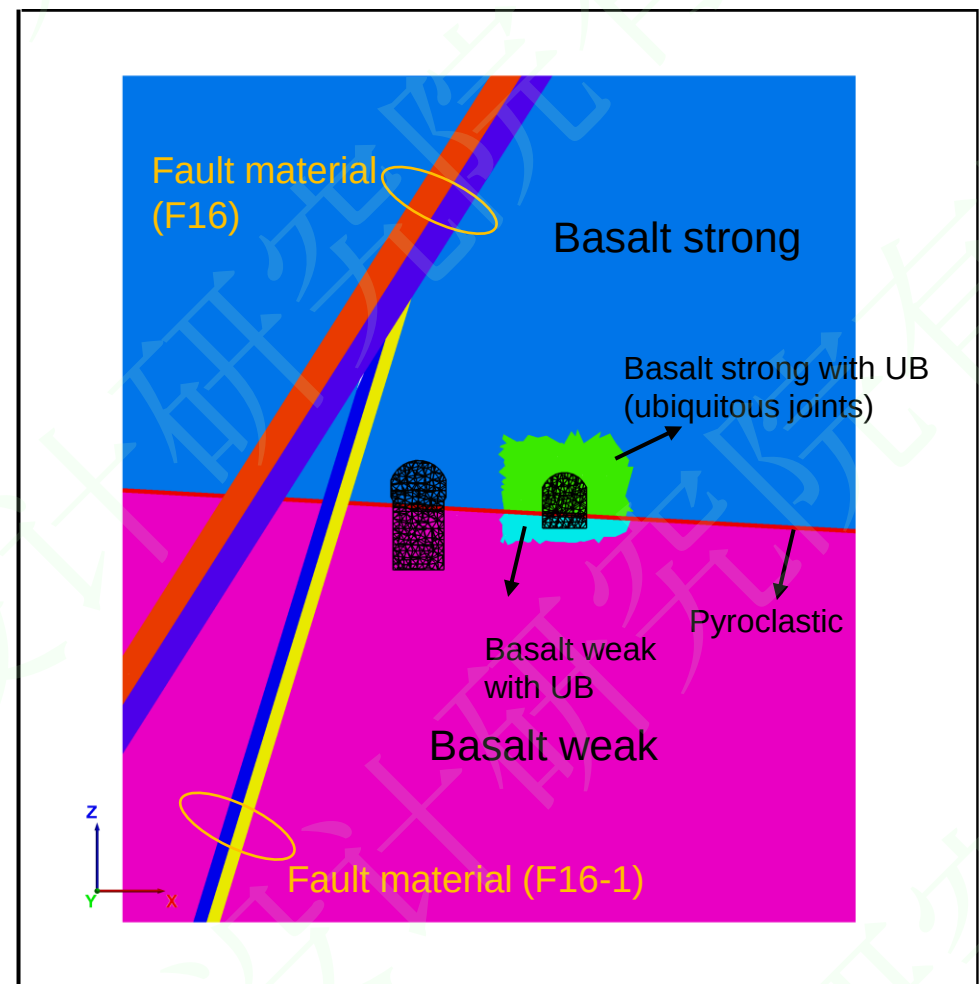
03 K项目地下工程

- (5) 北端墙局部围岩稳定



- 在断层附近以及岩体质量差别较大的地方通常会存在局部应力异常
- 表现为相对软弱的岩体中应力降低，而坚硬岩体中的应力升高，形成局部应力集中
- 应力方向也将发生偏转

- (5) 北端墙局部围岩稳定



Vertical cross section

03 K项目地下工程

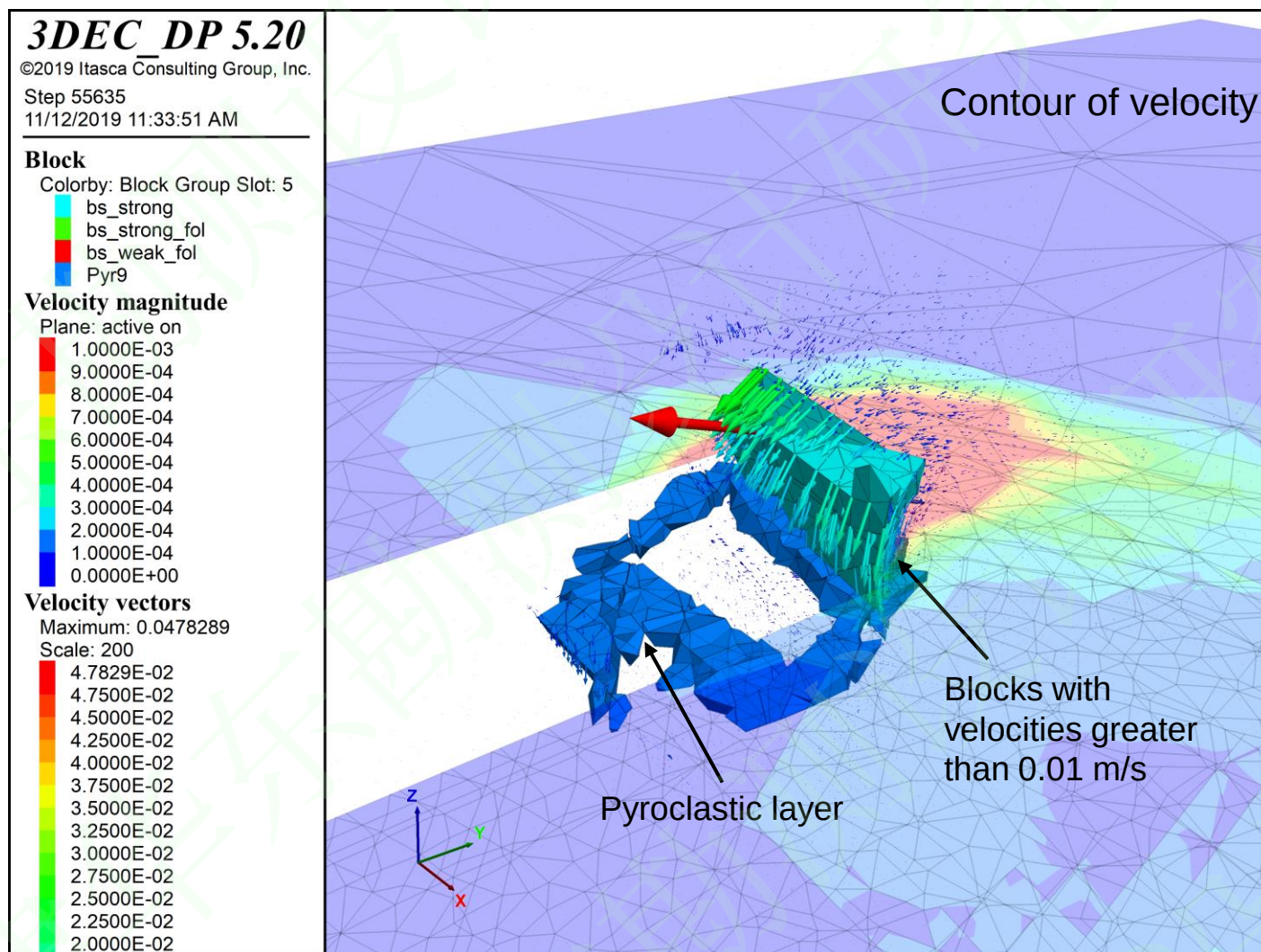
- (5) 北端墙局部围岩稳定

岩体及结构面力学参数（岩体采用应变软化本构模型）

Material	Constitutive model	Young's Mod. [GPa]	ν	Cohesion (residual) [MPa]	Friction angle (residual) [°]	Tensile strength (residual) [MPa]	Critical strain	UB joint dip/dd	UB cohesion (residual) [MPa]	UB friction angle (residual) [°]	UB tensile strength (residual) [MPa]
Basalt strong	Strain softening	20.0	0.25	2.2 (0.2)	46 (46)	0.1 (0.1)	0.005	-	-	-	-
Basalt strong with UB	Ubiquitous-Joint Model	20.0	0.25	2.2 (2.2)	46 (46)	0.1 (0.1)	-	15/130	0.45 (0.45)	31 (31)	0 (0)
Basalt weak	Strain softening	10.0	0.25	1.0 (0.1)	32 (32)	0.05 (0.05)	0.005	-	-	-	-
Basalt weak with UB	Ubiquitous-Joint Model	10.0	0.25	1.0 (1.0)	32 (32)	0.05 (0.05)	-	15/130	0.45 (0.45)	31 (31)	0 (0)
Fault	Mohr-Coulomb	1.0	0.25	0.1 (0.1)	23 (23)	0 (0)	-	-	-	-	-
Pyroclastic	Mohr-Coulomb	1.0	0.25	0 (0)	20 (20)	0 (0)	-	-	-	-	-

03 K项目地下工程

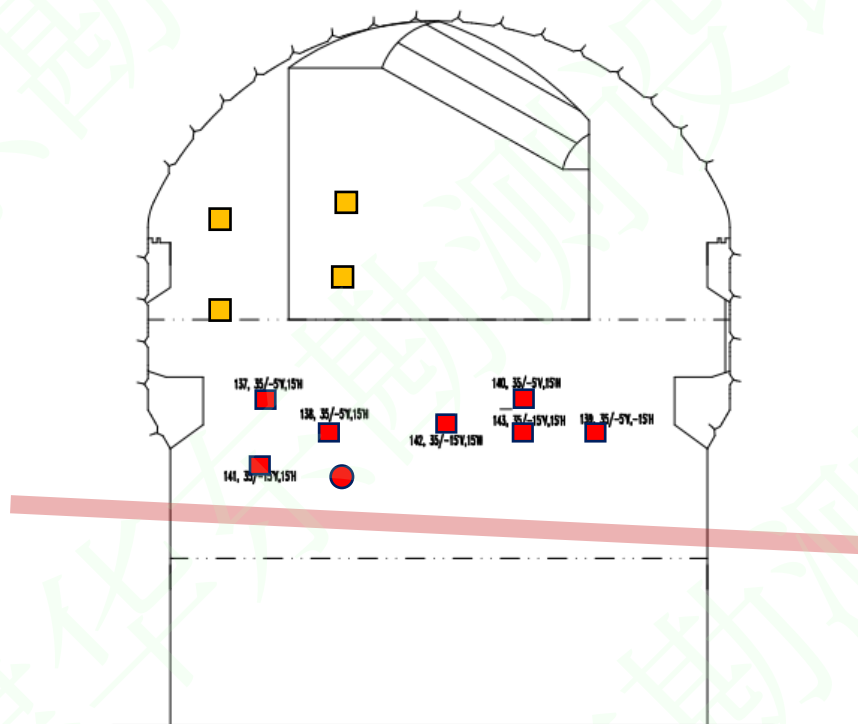
- (5) 北端墙局部围岩稳定



Rock mass behavior (moving, fos<1.0) at final stage of excavation

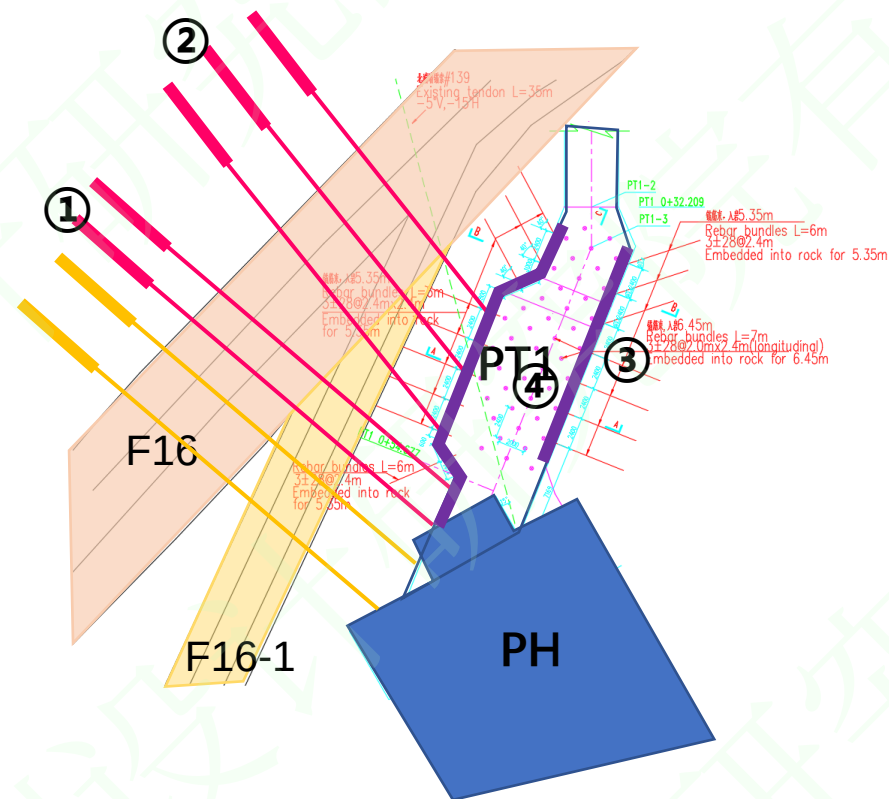
03 K项目地下工程

- (5) 北端墙局部围岩稳定



Support enhancement:

- ① 4 tendons in north ending wall; ★★★★★
- ② tendons in sidewall of PT1 ★★★★★
- ③ pattern rebar bundles ★★
- ④ concrete lining in PT1 ★
- ⑤ grouting of rock mass ★



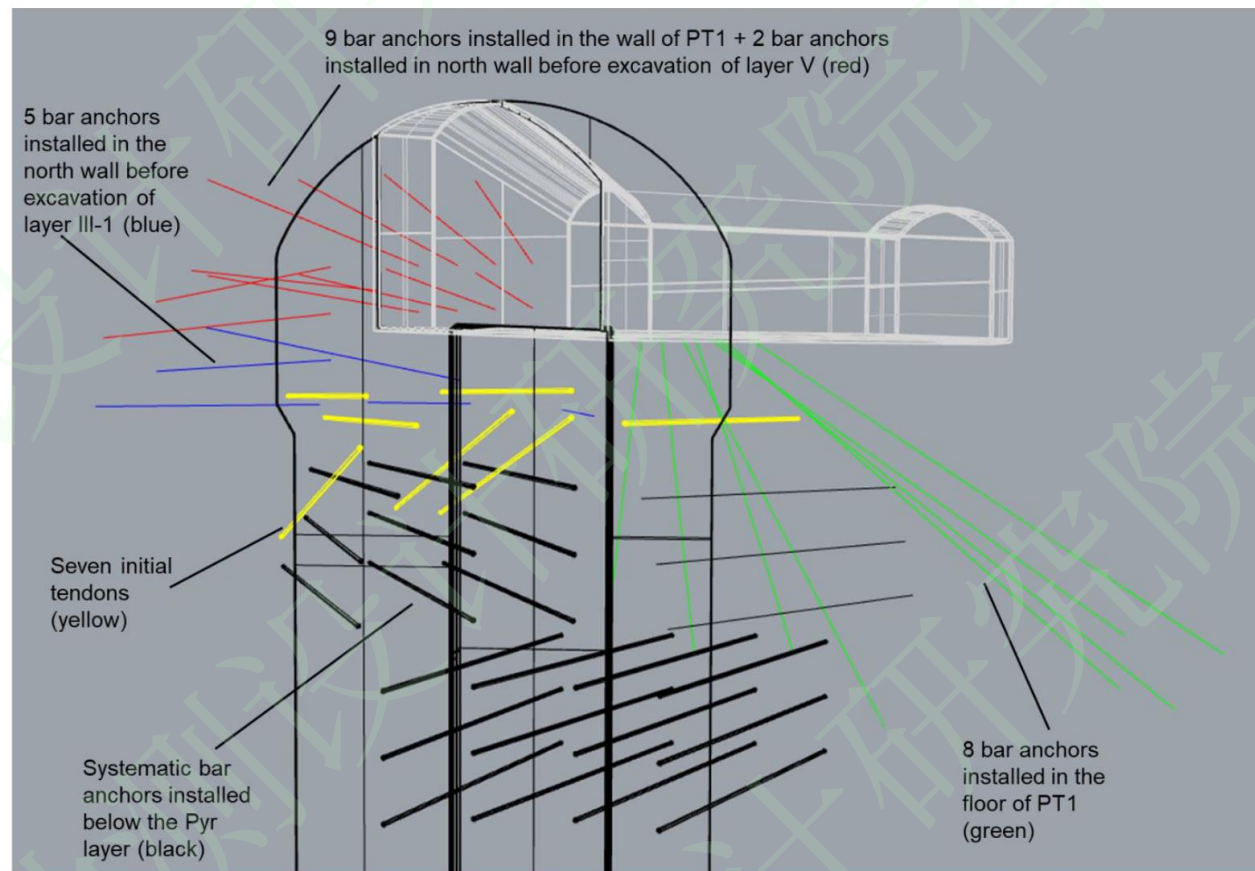
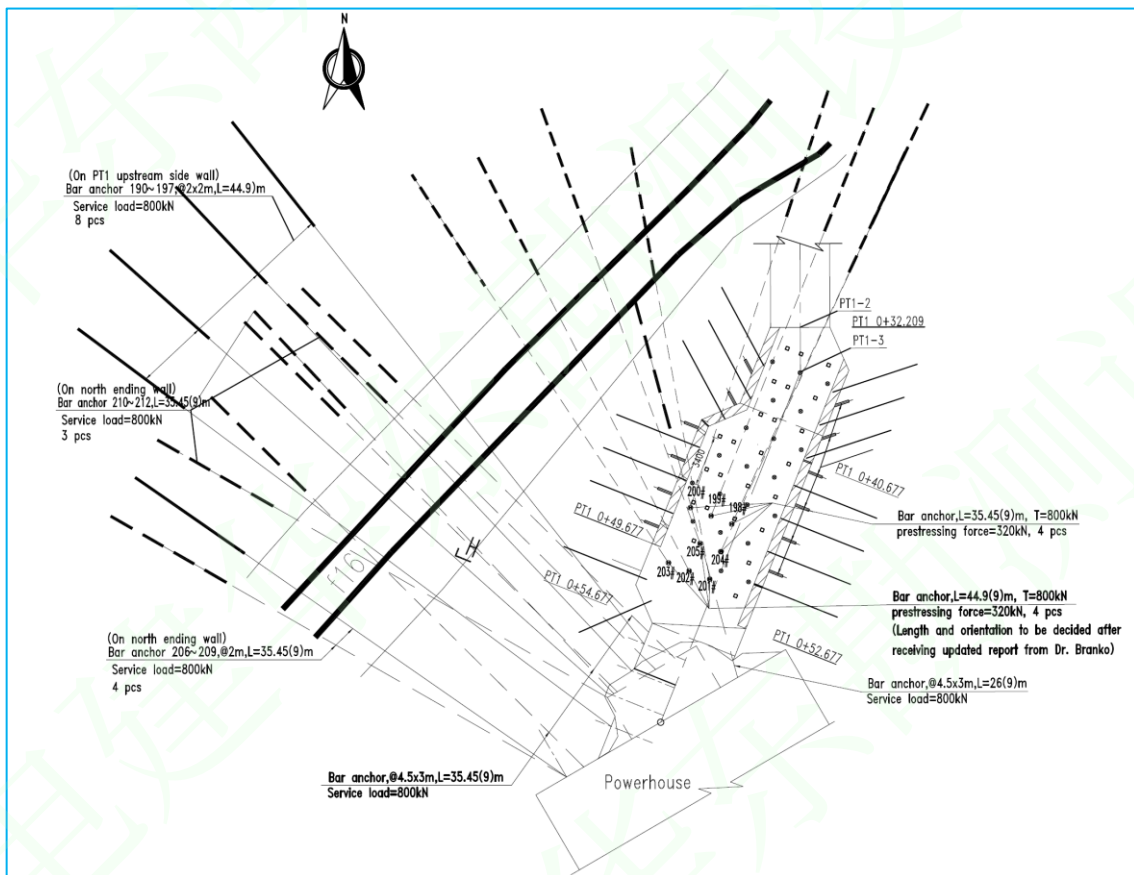
Schedule:

① → ② → ③ → ④ → ⑤

03 K项目地下工程

- (5) 北端墙局部围岩稳定

实施的加固设计方案

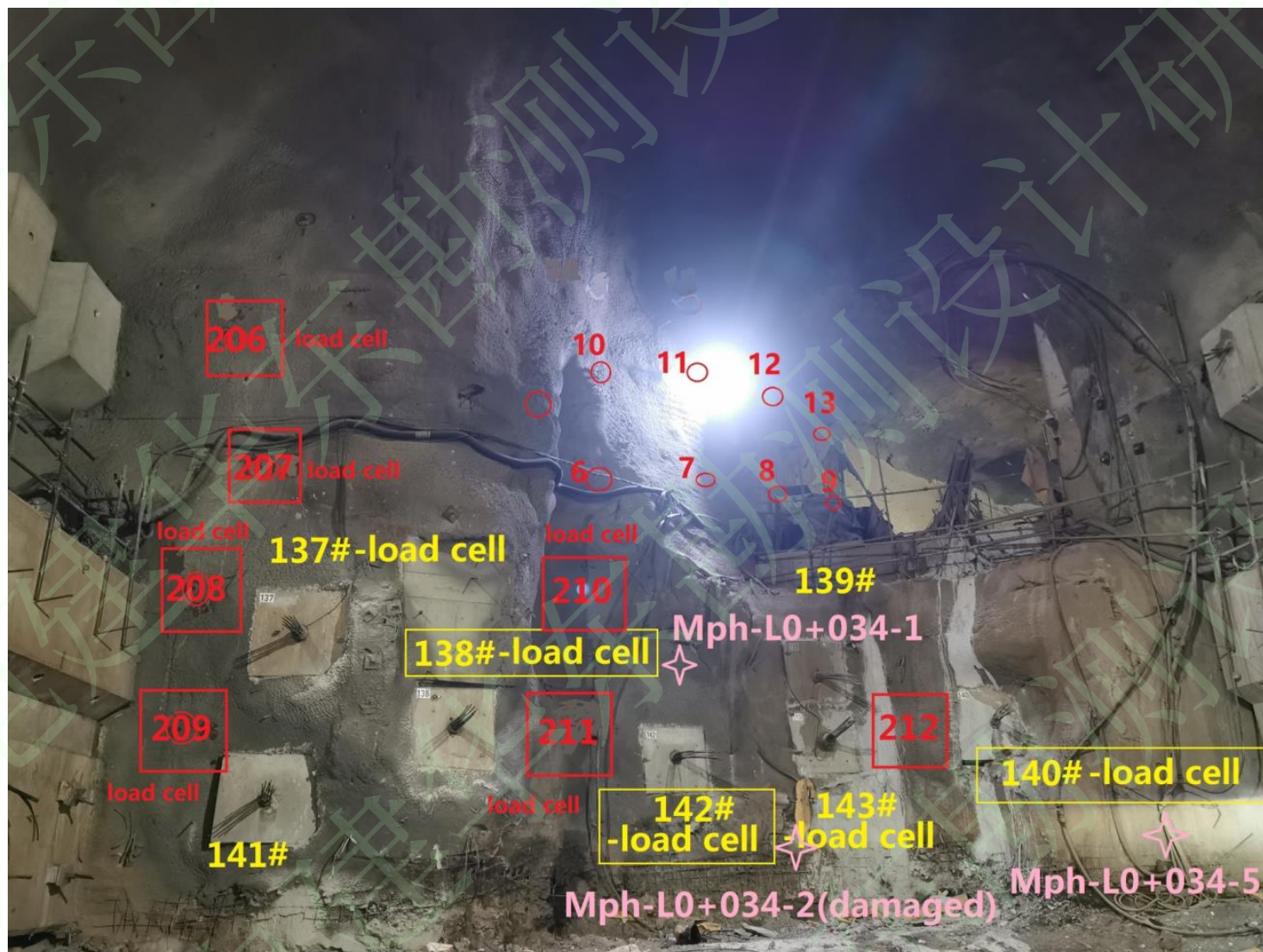


预应力锚索、预应力钢棒、锚筋束、固结灌浆

03 K项目地下工程

- (5) 北端墙局部围岩稳定

监测布置



□ 锚索测力计

□ 钢棒测力计

□ 多点位移计

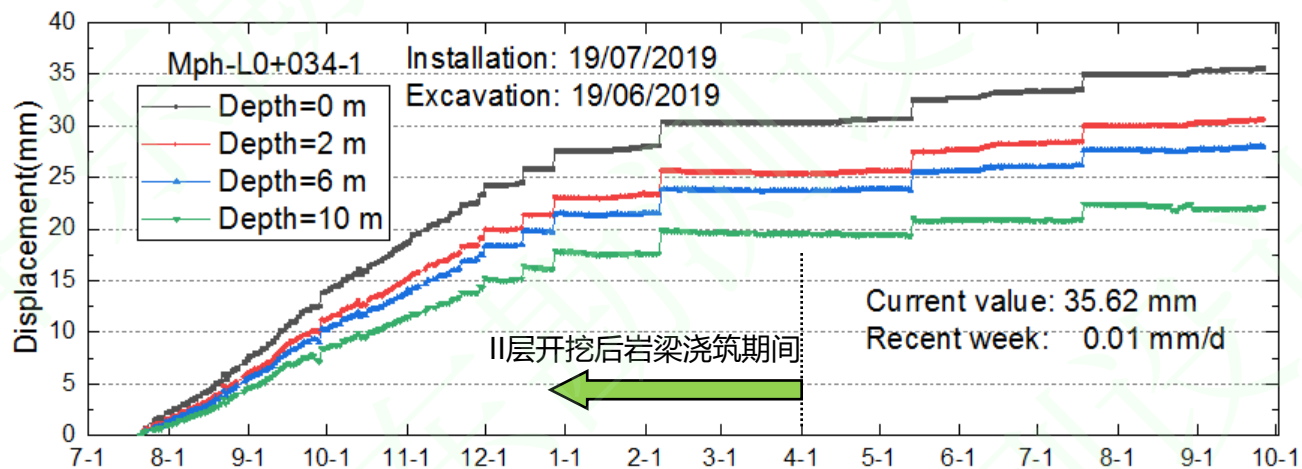
□ 棱镜

□ 测斜孔

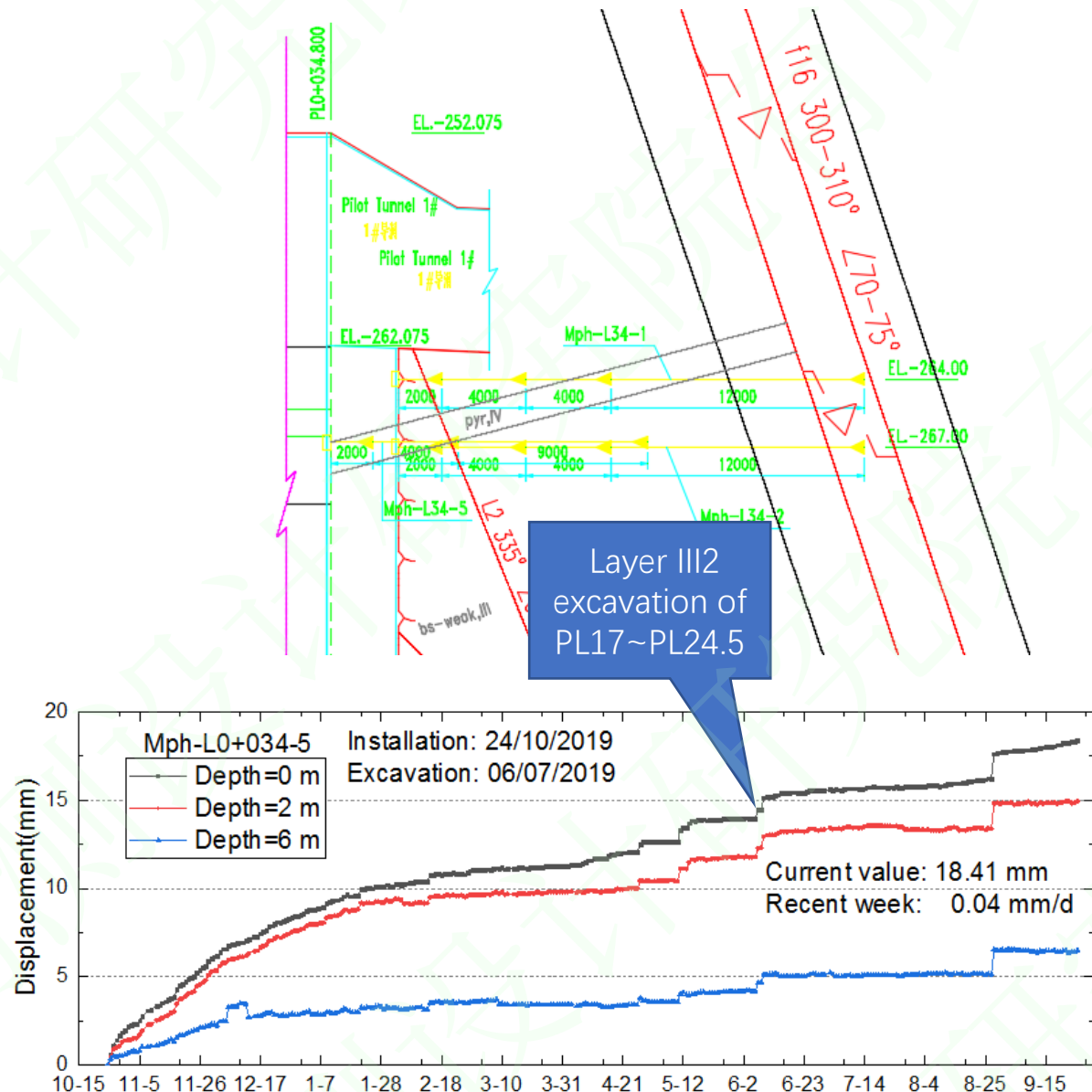
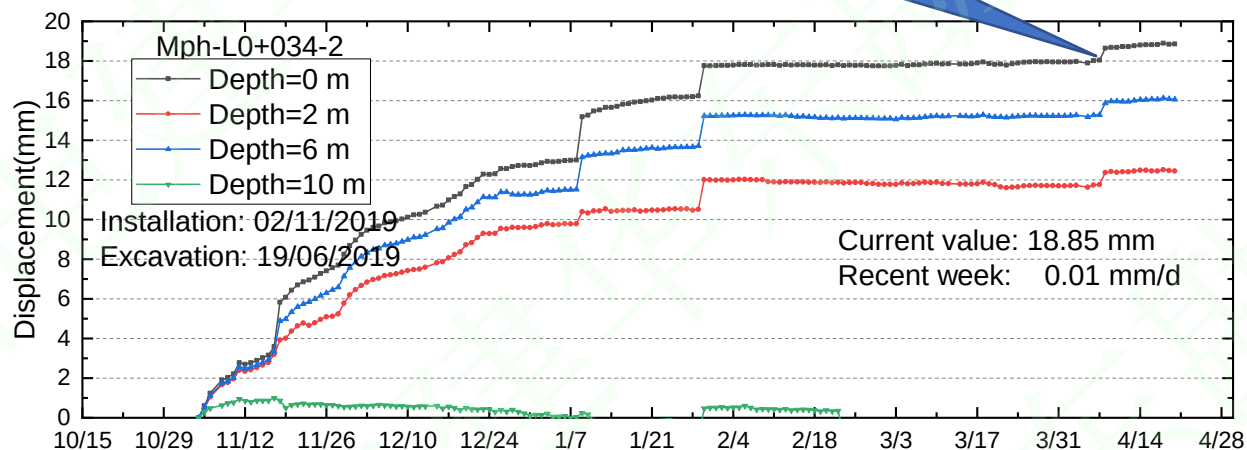
03 K项目地下工程

- (5) 北端墙局部围岩稳定

多点位移计

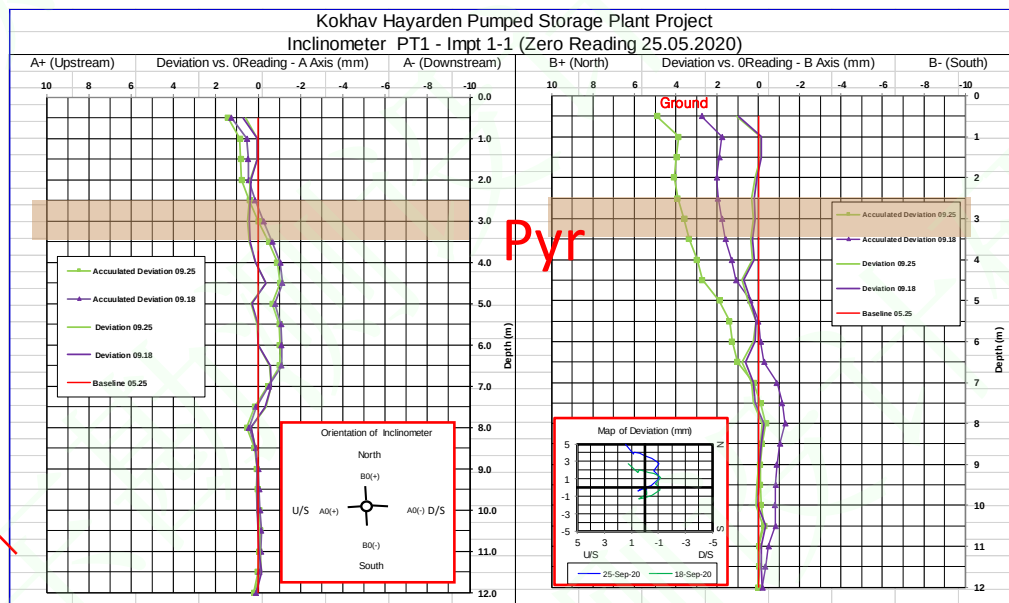
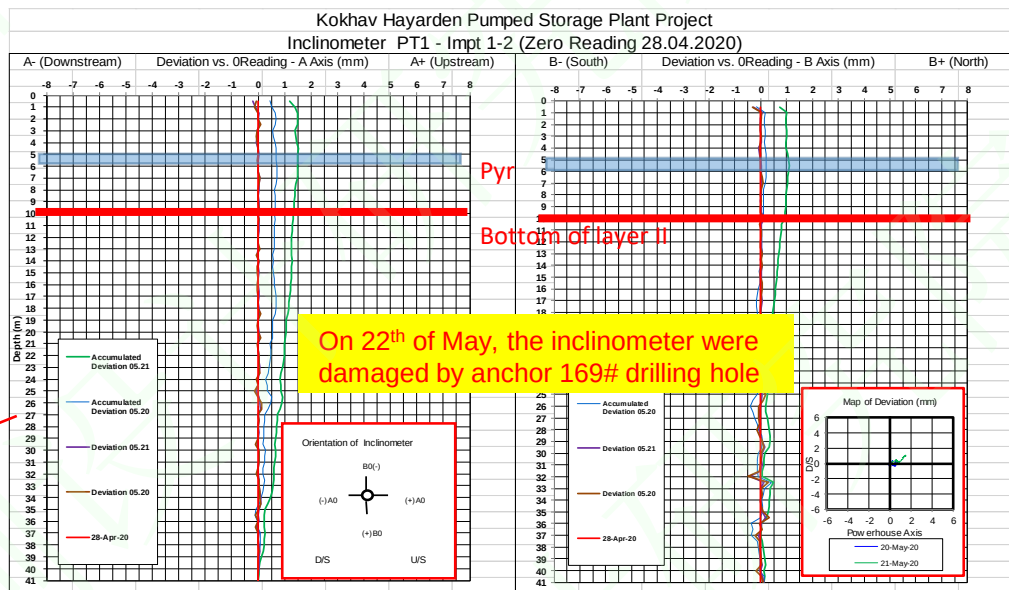
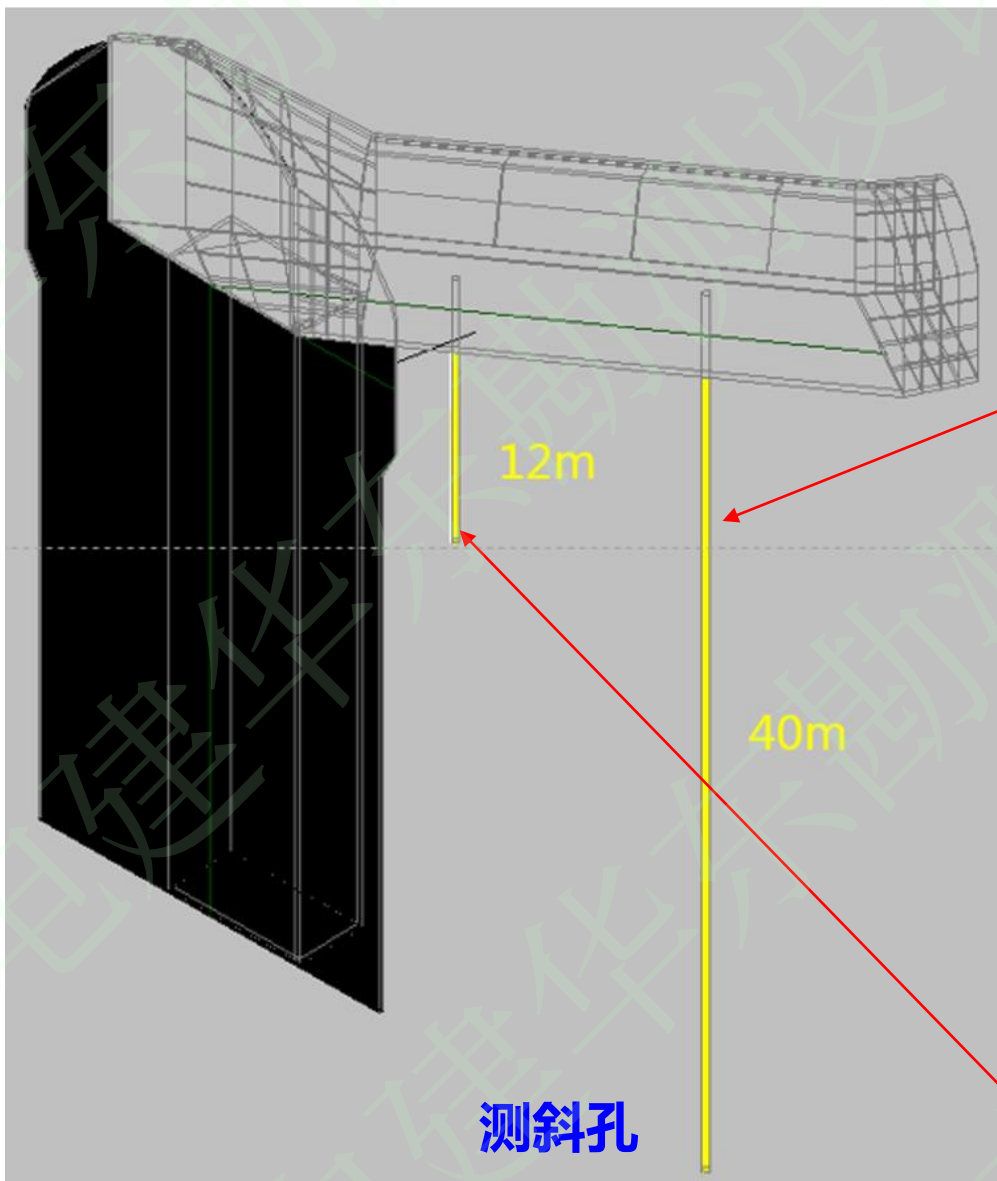


De to the disturbance of anchors drilling



03 K项目地下工程

- (5) 北端墙局部围岩稳定



03 K项目地下工程

- (5) 北端墙局部围岩稳定

反演分析

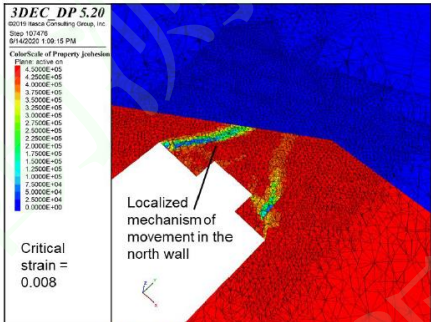
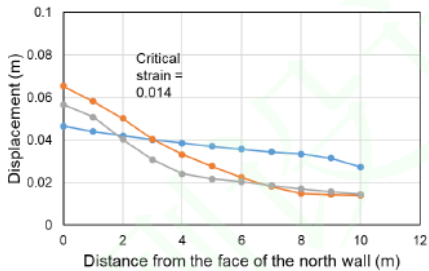
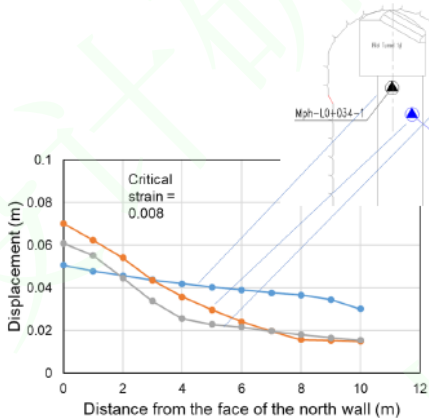
修正岩体及结构面力学参数

Lithology	Constitutive model	Young's Mod. [GPa]	ν	Cohesion (residual) [MPa]	Friction angle (residual) [°]	Tensile strength (residual) [MPa]	Critical strain	Dilation angle (residual) [°]
Basalt strong	Strain softening	7.5	0.25	2.7 (0.1)	47 (47)	0.06 (0.06)	0.008 – 0.014	5 (5)
Basalt strong with UB	Subi	7.5	0.25	2.7 (0.1) UB: 0.45 (0.05)	47 (47) UB: 31 (31)	0.06 (0.06) UB: 0.0 (0.0)	0.008 – 0.014 UB: 0.008 – 0.014	5 (5) UB: 5 (5)
Basalt weak	Strain softening	4.75	0.25	2.05 (0.1)	41 (41)	0.03 (0.03)	0.008 – 0.014	5 (5)
Faults	Mohr-Coulomb	1.2	0.25	0.1 (0.1)	23 (23)	0 (0)	-	5 (5)
Pyroclastic	Mohr-Coulomb	1.2	0.25	0.7 (0.7)	20 (20)	0 (0)	-	5 (5)
Basalt Class V	Mohr-Coulomb	0.65	0.25	0.76 (0.76)	23 (23)	0	-	5 (5)

Contact	Constitutive model	Kn [GPa/m]	Ks [GPa/m]	Cohesion (residual) [MPa]	Friction angle (residual) [°]	Tensile strength (residual) [MPa]	Dilation angle (residual) [°]
Faults	Coulomb slip	10.0	5.0	0.1 (0)	23 (23)	0 (0)	5 (5)
Explicit joints	Coulomb slip	50.0	25.0	0.45 (0)	31 (31)	0 (0)	5 (5)
Pyroclastic contacts	Coulomb slip	10.0	5.0	0.7 (0)	20 (20)	0 (0)	5 (5)

岩体极限塑性应变取值的影响

围岩变形反演分析



锚索荷载反演分析

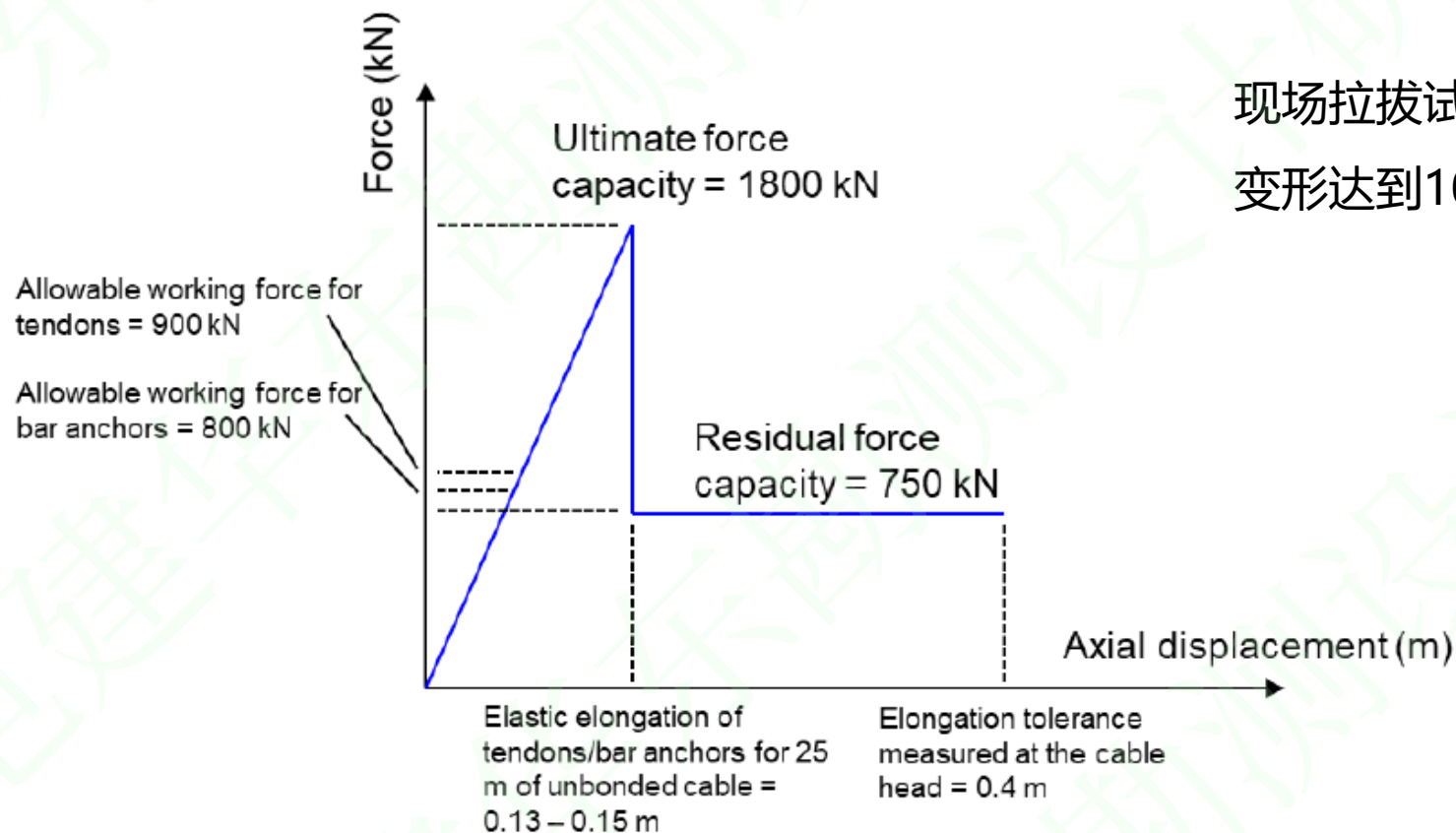
	监测值/t	计算值/t $\epsilon=0.008$	计算值/t $\epsilon=0.014$
137	53	55	53
138	51	56	56
139	53	53	49
140	60	49	48
141	59	55	55
142	49	51	50
143	50.5	52	49

03 K项目地下工程

- (5) 北端墙局部围岩稳定

反演分析

修正支护本构模型



现场拉拔试验成果表明在荷载达到1900kN时，锚索变形达到10cm，鉴于试验成果：

- 修正锚索/钢棒力学本构
- 采用考虑峰后特性的本构

03 K项目地下工程

- (5) 北端墙局部围岩稳定

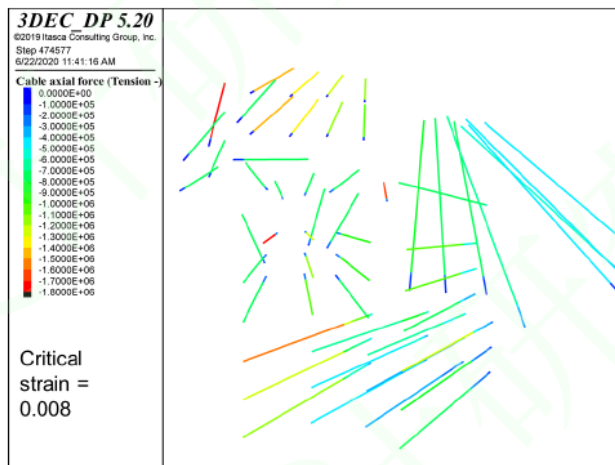
后续开挖响应预测和稳定性评价

采用强度折减法来求解洞室稳定安全系数:

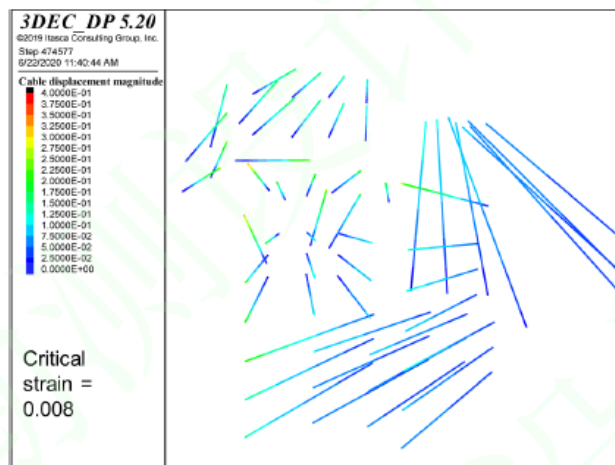
- ◆ 围岩变形收敛
- ◆ 锚索荷载未大规模超限

OE要求开挖完成后北端墙围岩整体安全系数
不小于1.3

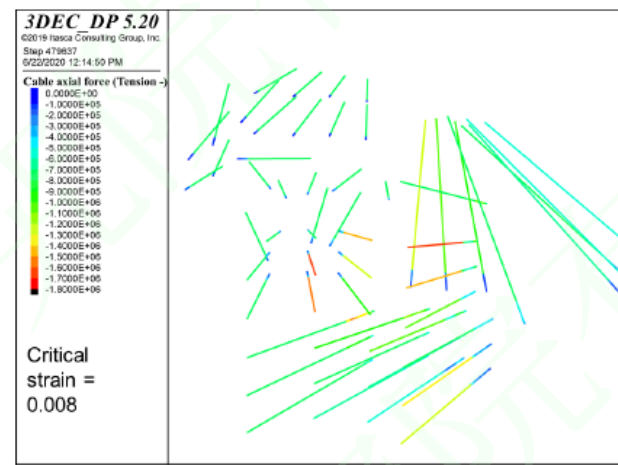
锚索荷载



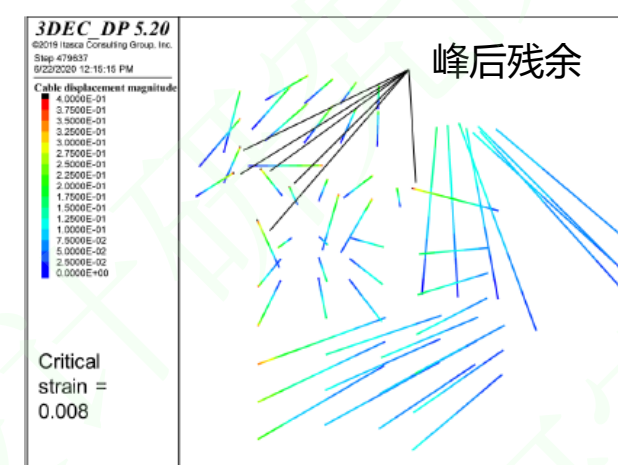
锚索变形



(FoS=1.3)



峰后残余



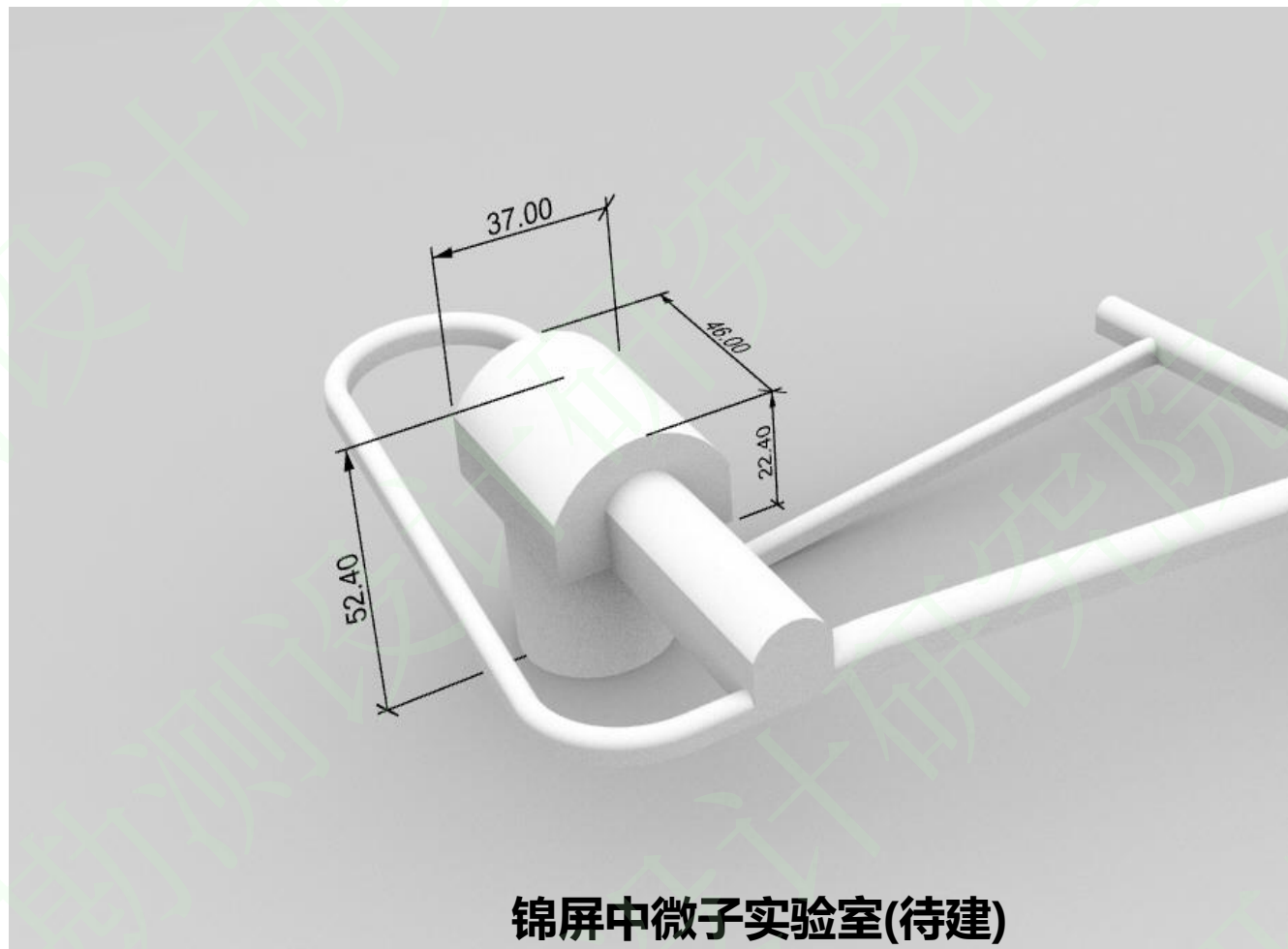
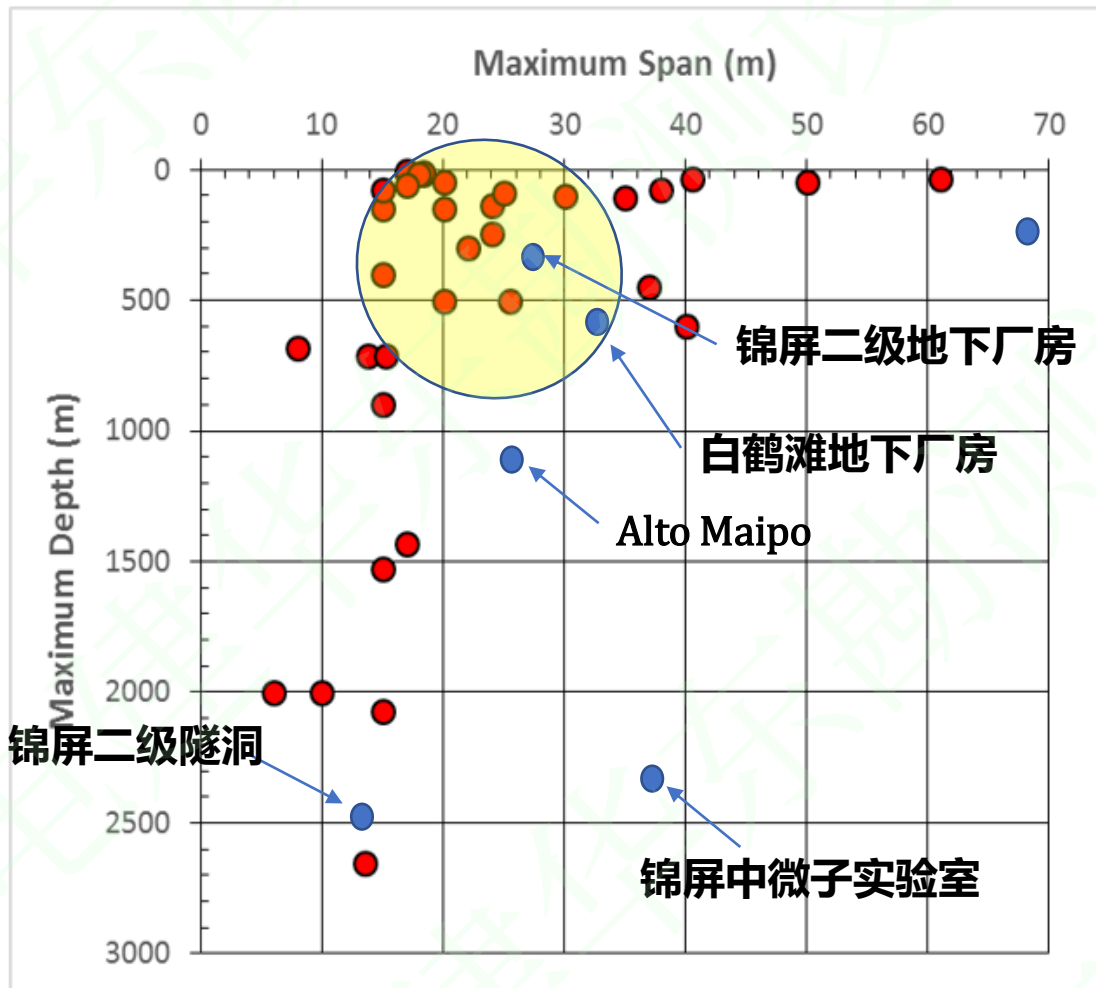
(FoS=1.5)

04 | 展 望

04展望

- 超大跨度洞室群建设关键技术

超深埋大跨度的地下洞室在设计与施工等环节面临挑战





华东勘测设计研究院有限公司
HUADONG ENGINEERING CORPORATION

谢谢

H U A D O N G E N G I N E E R I N G C O R P O R A T I O N