



第二届中日高速铁路岩土工程研讨会

隧道支护结构体系的协同作用原理

Synergistic Effects of Tunnel Support Structure System

张顶立 Dingli Zhang

北京交通大学土木建筑工程学院

School of Civil Engineering Beijing Jiaotong University

2017年8月28日 日本 札幌



1 隧道工程的基本问题

Basic problems associated with tunnel engineering

2 隧道围岩结构及其荷载效应

Tunnel support system and its loading effect

3 复杂隧道围岩安全性及其评价方法

Safety of complex surrounding rock and its evaluation method

4 隧道支护与围岩的动态作用

Interactions between surrounding rock and support

5 隧道支护结构的协同作用原理

Collaborative effects of tunnel support structures

6 隧道围岩空间变异性的力学响应分析

Mechanical response of surrounding rock spatial variability

7 结束语 **Conclusions**



“八纵八横”高速铁路网带来的问题:

- ▶ 长大隧道多，隧道占比大；
- ▶ 复杂地质条件难以避开；
- ▶ 投资比重大——**造价高**；
- ▶ 隧道施工进度慢——**控制工程**

2025年将建成高速
铁路网**3.8**万km!

隧道工程在高铁网建设中地位极其重要!





项目背景与关键问题

高速铁路隧道难点

- 隧道断面大—围岩变异性影响不能忽略；
- 长大隧道多—施工速度要求高；
- 不良地质及复杂地形多—施工风险极高；
- 高可靠性要求—工程质量和耐久性控制严。





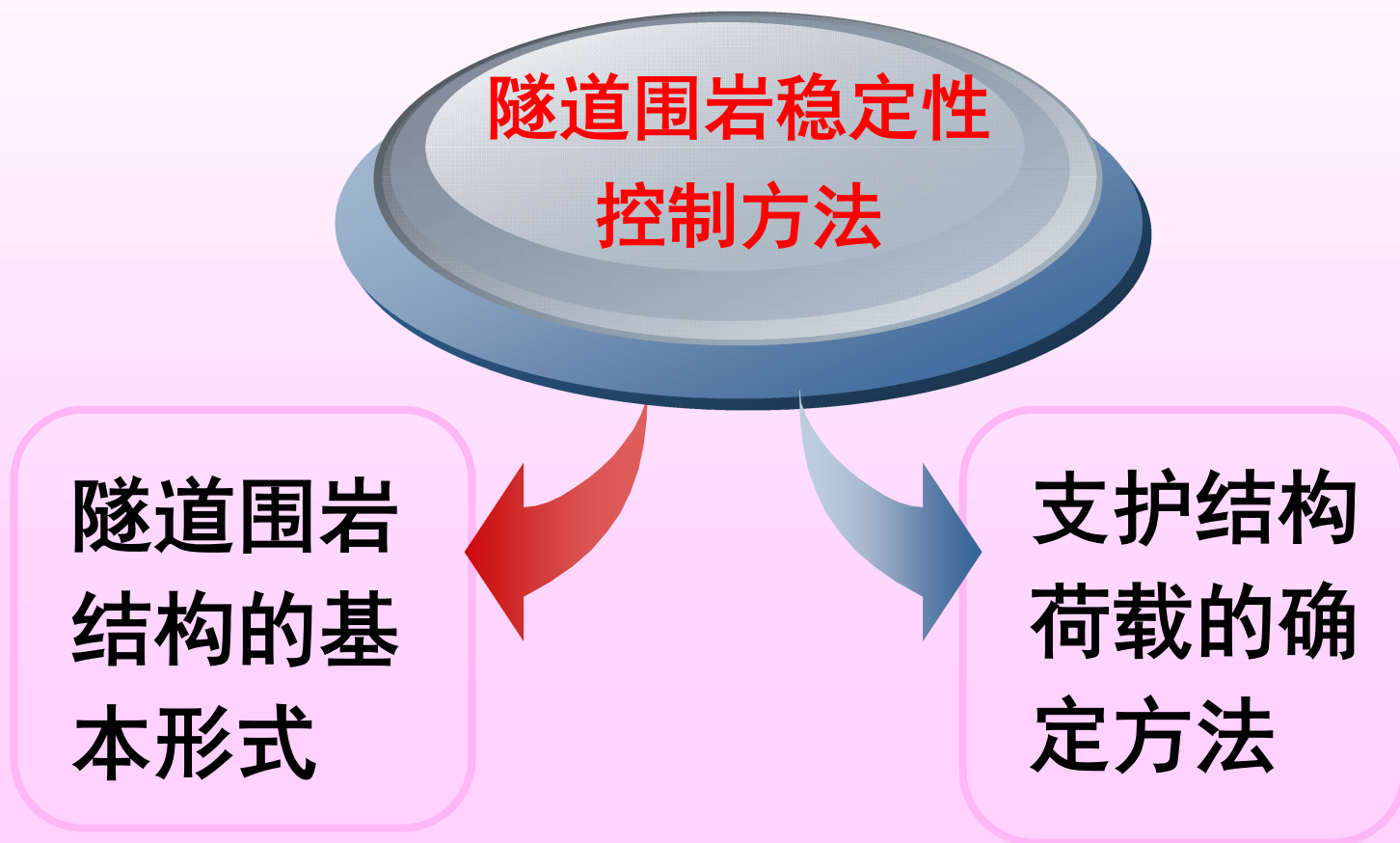
隧道设计现状与问题

- ① 对围岩结构性及失稳机理认识不清，且围岩变异性影响未予考虑，**支护结构荷载无法量化计算**；
- ② 仅强调二次衬砌结构荷载校验，而**忽略初期支护及超前预支护的作用**，这与事实严重不符；
- ③ **对工程经验的过度依赖性**，缺乏系统的设计理论，使得设计方案难以适应复杂多变的地质条件，**局限性大**；
- ④ 采用**基于工程经验的定值设计**，**无法保证整体结构安全实现量化**，迫切需要整体安全性能设计。

显然，设计理论无法满足大规模高速铁路隧道建设的需要！



隧道工程设计的核心问题：





1 隧道工程的基本问题

➤ 施工扰动影响的动态过程：
Disturbance due to tunnel construction





1 隧道工程的基本问题

➤ 隧道及地下工程学科的研究对象：
Research objects of the tunneling and underground engineering





1 隧道工程的基本问题

隧道工程设计的基本问题：

Essential issues of tunnel design

围岩结构特性
及其荷载效应

“支护-围岩”作
用关系

支护结构特性及
其适应性

隧道支护结构设计方法



1 隧道工程的基本问题

隧道支护设计 Tunnel support design

隧道围岩特性

- ◆ 完整岩石特性
- ◆ 岩体节理特性
- ◆ 岩体初始应力状态
- ◆ 地下水情况
- ◆

隧道支护特性

- ◆ 支护结构材料
- ◆ 支护结构类型
- ◆ 支护结构尺寸
- ◆ 支护时空特点
- ◆

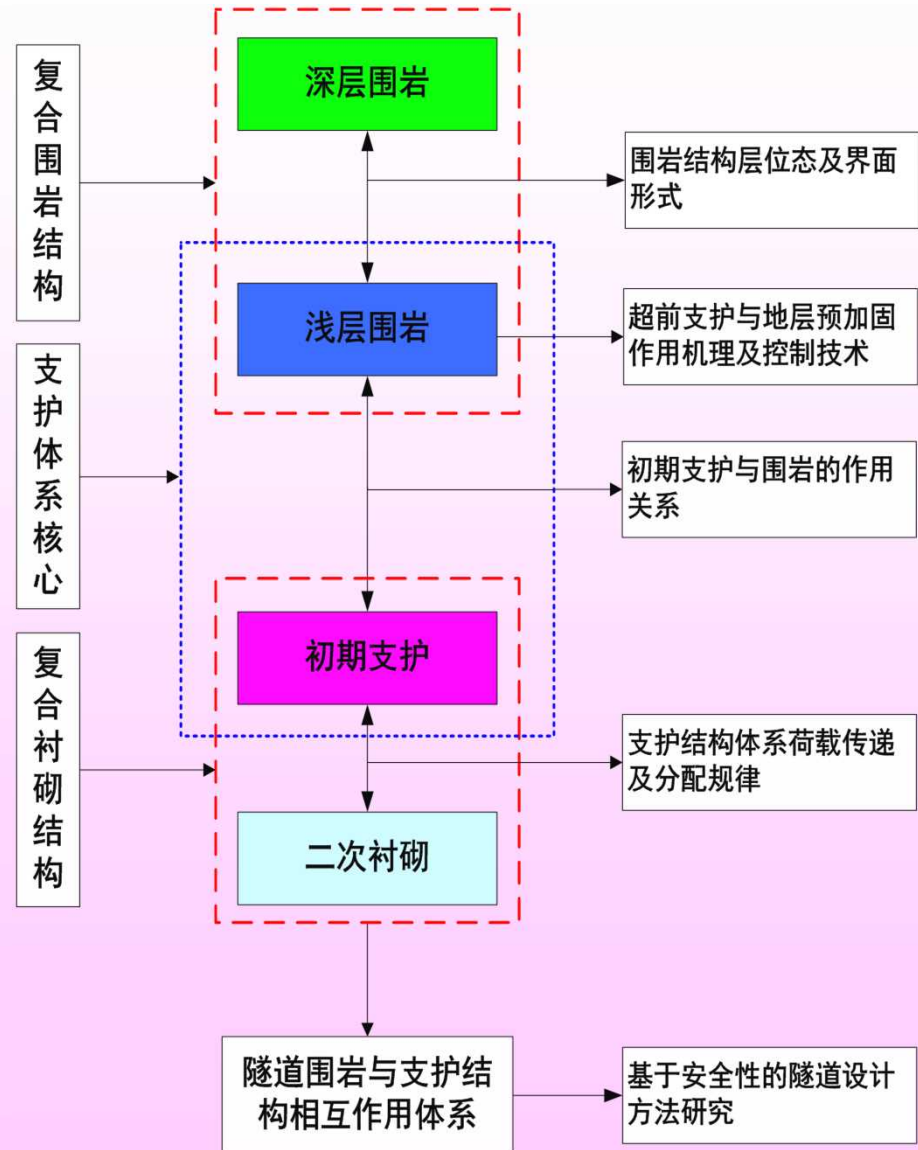
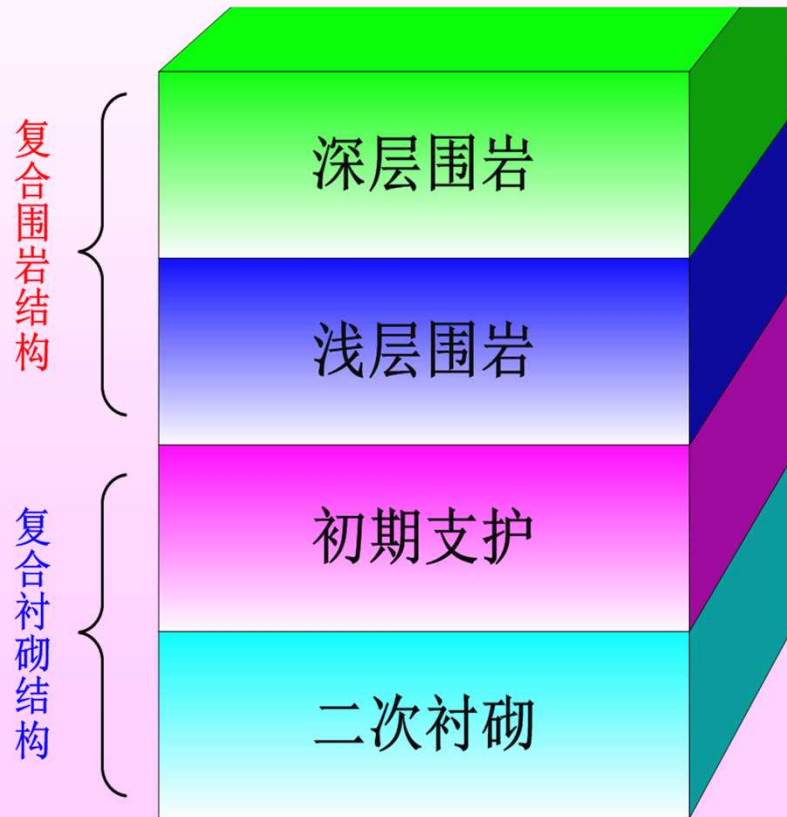
不确定性

支护与围岩作用
更加复杂化！



2 隧道围岩结构及其荷载效应

支护与围岩作用体系 *Tunnel surrounding rock and support system*



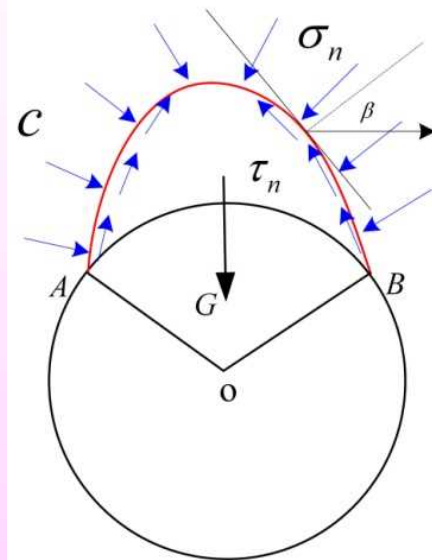


2 隧道围岩结构及其荷载效应

● 深浅埋围岩判据

Determination of internal and external surrounding rock

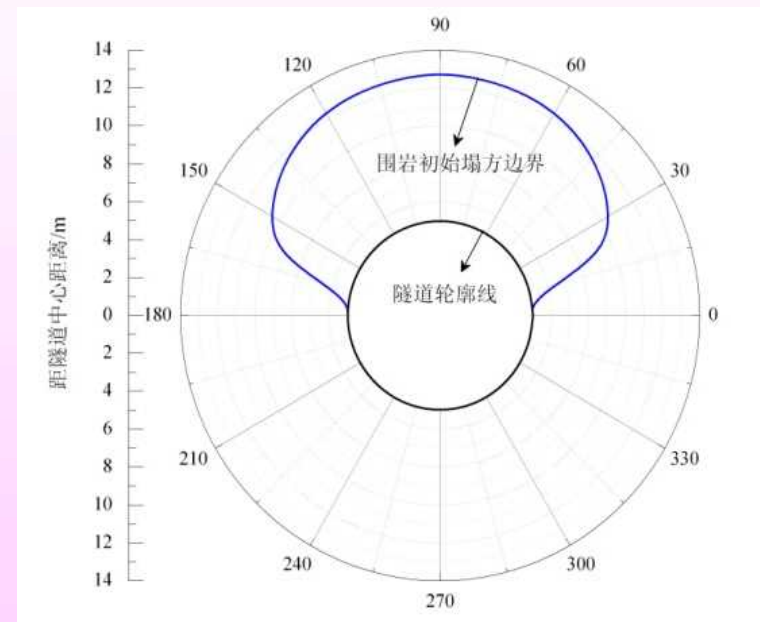
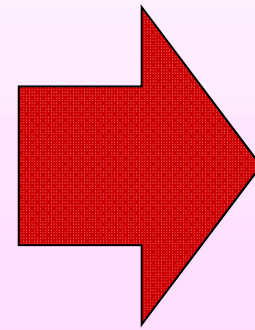
围岩失稳模式和范围确定—围岩上部破坏范围确定



塌方体稳定性分析模型

根据极限状态条件，当主动力大于或等于被动抗力时，潜在坍塌体就会向下运动，发生塌方：即上图曲线上各类型应力满足如下条件：

$$\Omega = \int_s [\sigma_n \tan(\varphi) \cos \beta + c - \sigma_n \cdot \sin \beta] ds - G \sin \alpha$$



隧道上方潜在垮落区范围



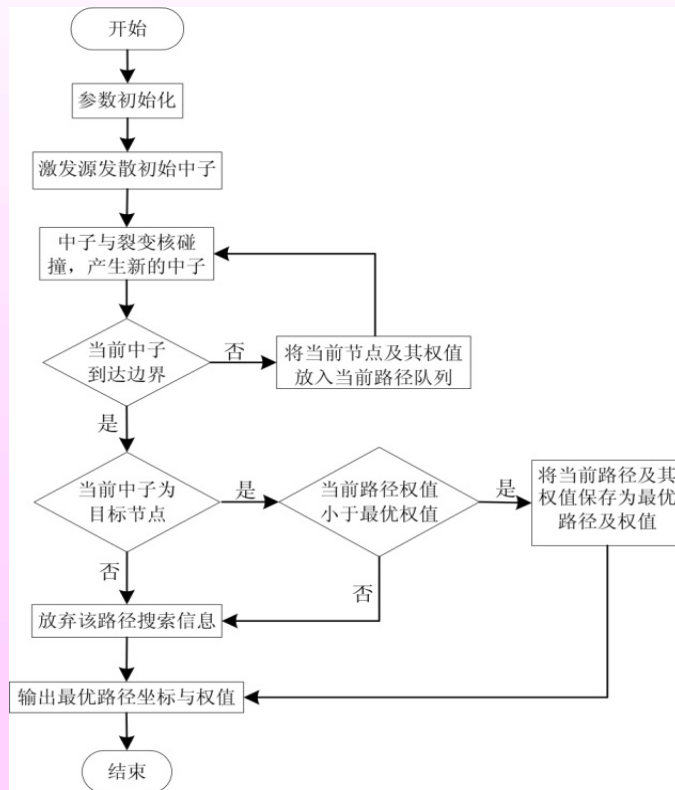
2 隧道围岩结构及其荷载效应

围岩失稳模式和范围确定

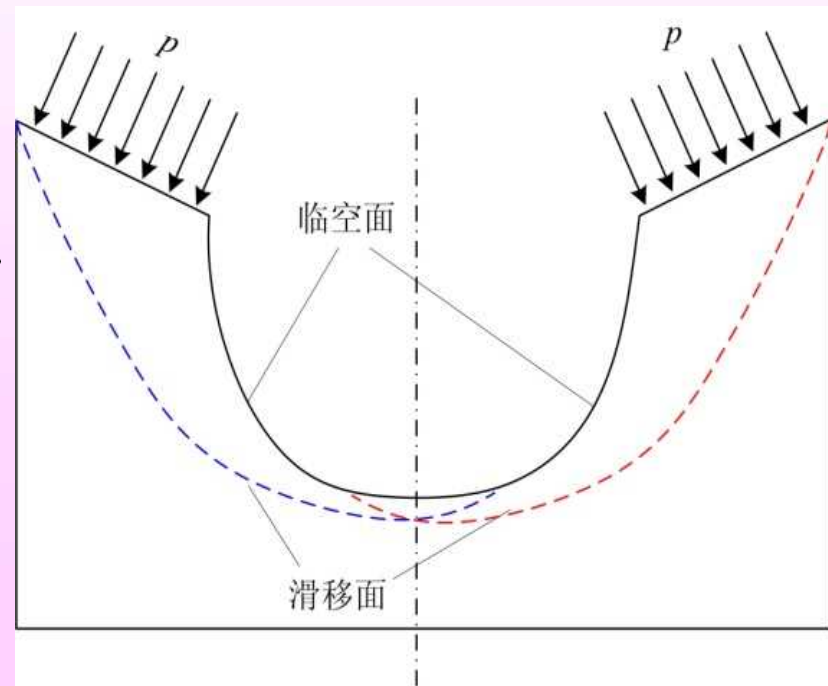
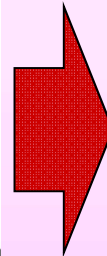
Determination of surrounding rock failure modes

— 隧道围岩下部破坏范围确定

Failure range of surrounding rock below tunnel



算法流程图



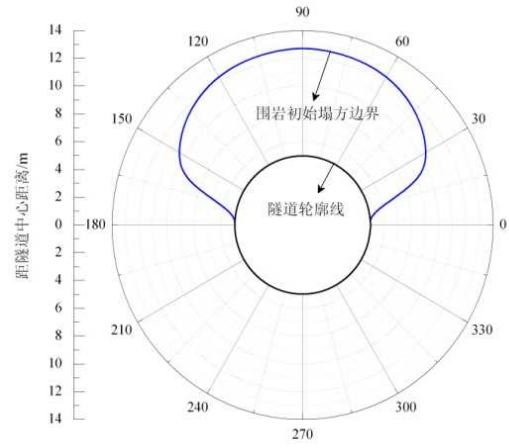
隧道下方滑移区范围



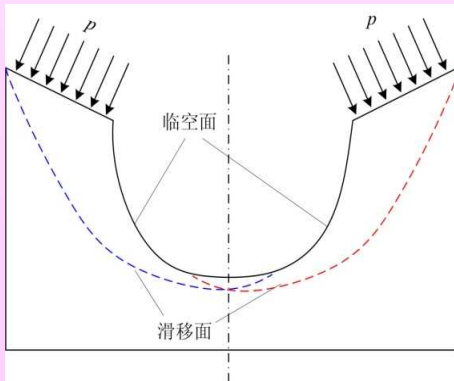
2 隧道围岩结构及其荷载效应

围岩失稳模式和范围确定—隧道围岩总破坏范围确定

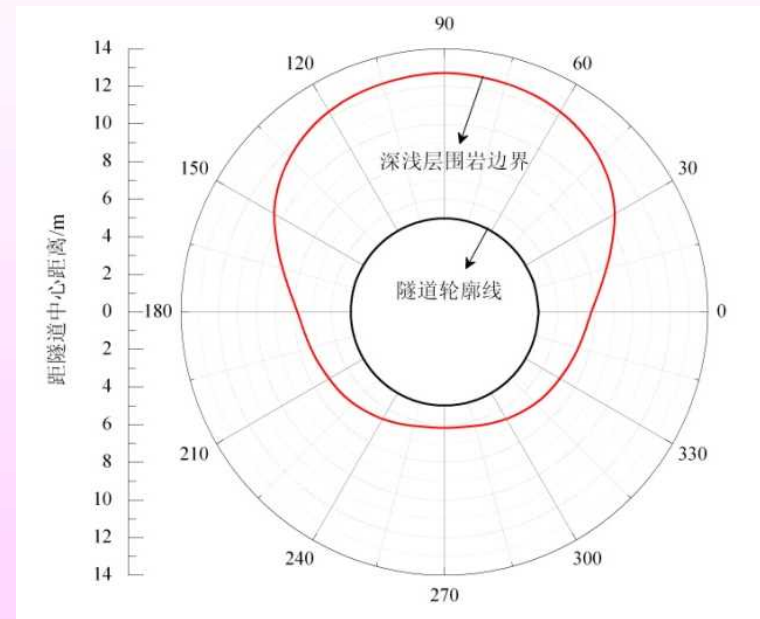
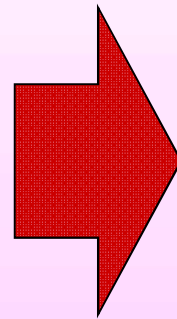
Total failure range of tunnel surrounding rock



隧道上方潜在垮落区范围



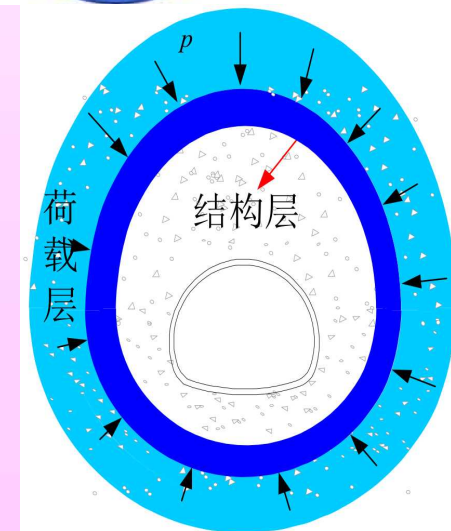
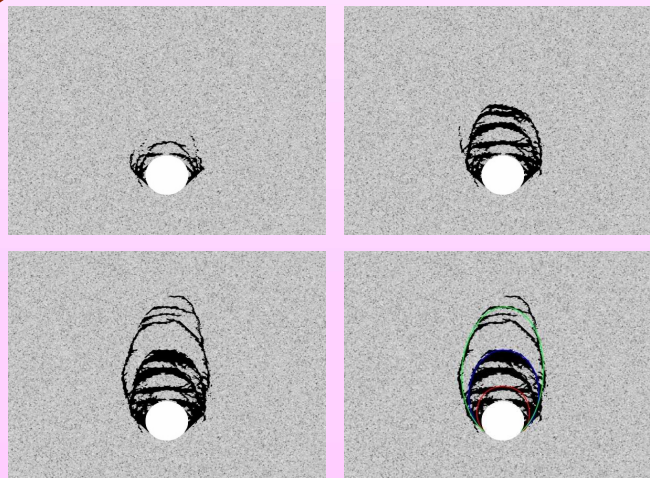
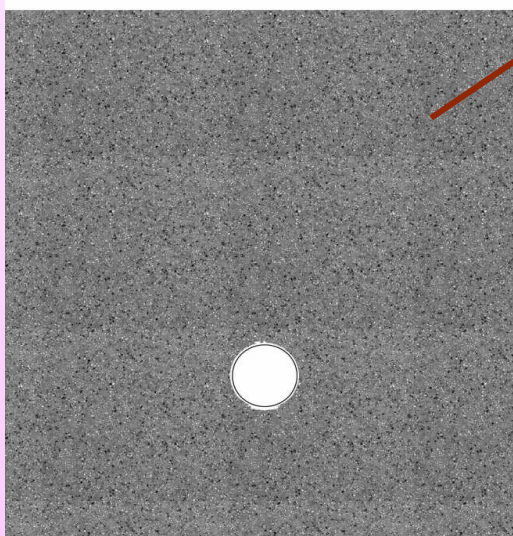
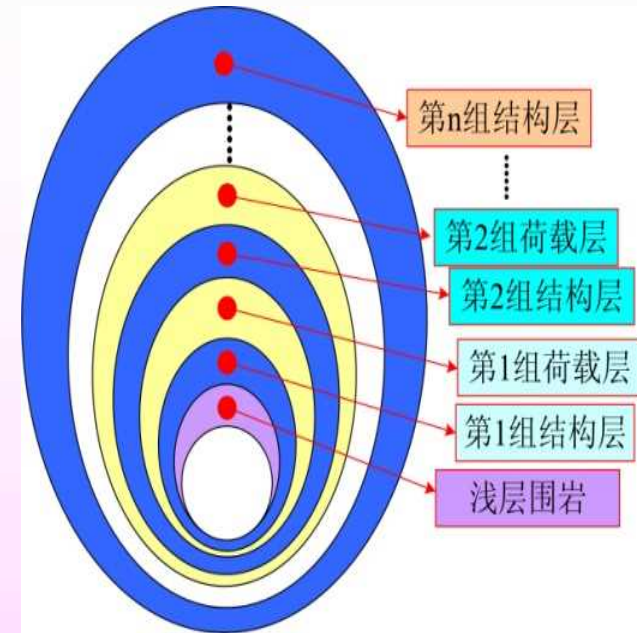
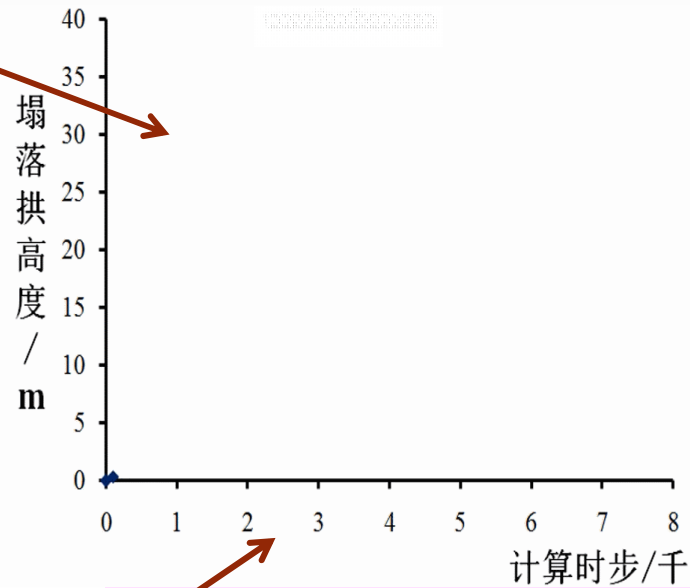
隧道下方滑移区范围



围岩失稳边界范围



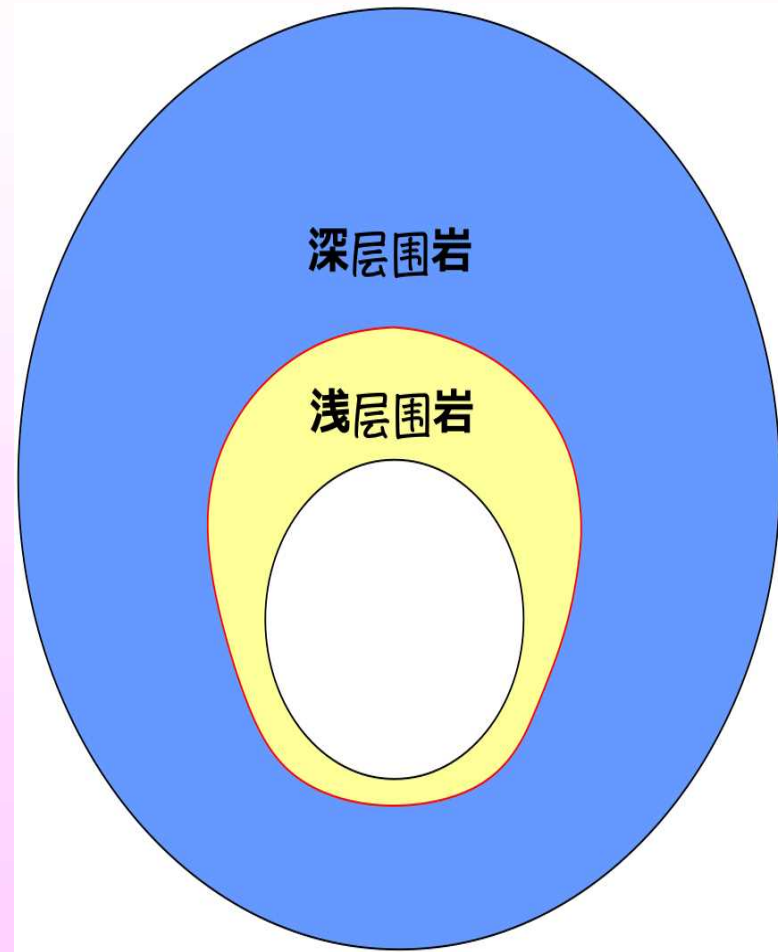
2 隧道围岩结构及其荷载效应





2 隧道围岩结构及其荷载效应

考虑到围岩稳定性的差异性：
隧道周边一定范围内丧失整体稳定性而无法实现长期自稳的松动区围岩划分为浅层围岩，这部分围岩需要及时支护；在此范围以外整体稳定性较好而且能够承担地层荷载的围岩则为深层围岩，若对深层围岩采取及时有效的支护和干预则可保持其稳定性。
显然，隧道围岩通常是由浅层围岩和深层围岩复合而成。

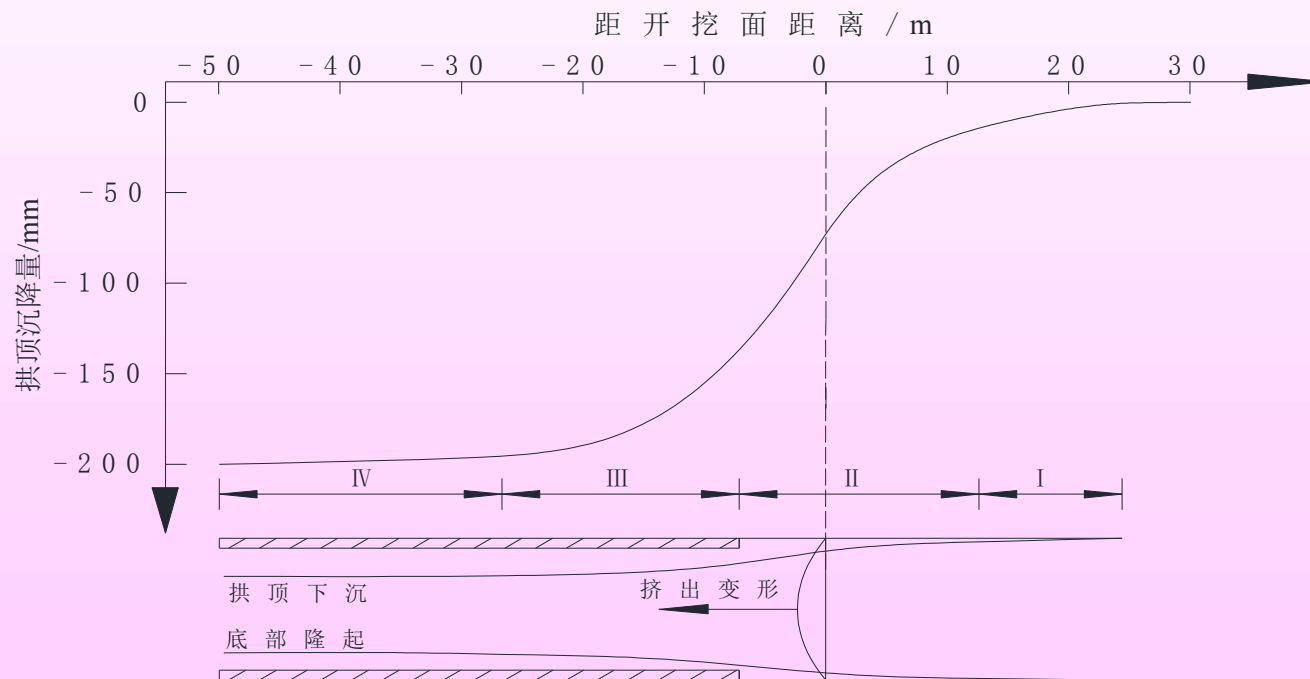




2 隧道围岩结构及其荷载效应

➤ 隧道围岩变形破坏的阶段性特点：

隧道围岩变形先后经历四个阶段，自掌子面前方开始，依次为**缓慢变形**、**急剧变形**、**变形减缓**和**变形稳定**。



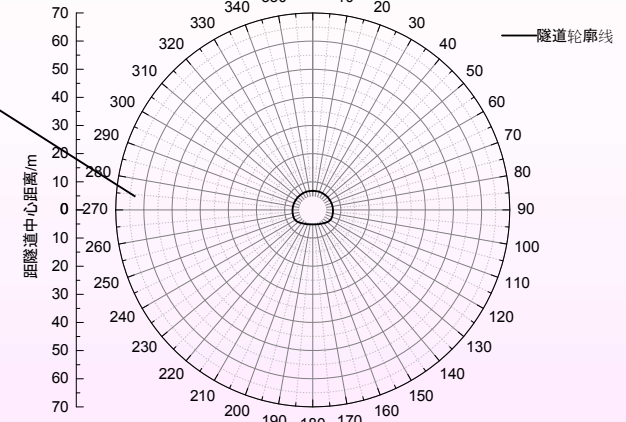
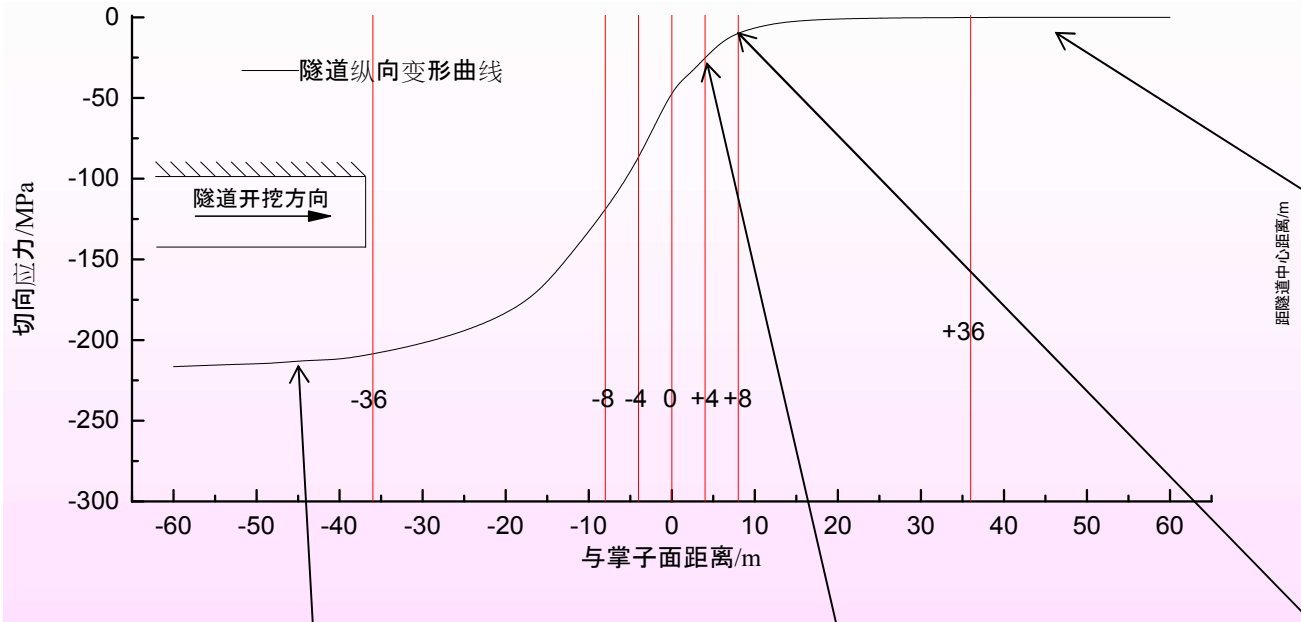
后方变形控制

掌子面变形控制

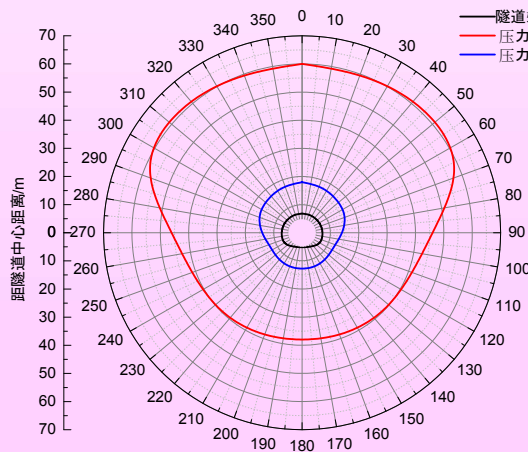
超前变形控制



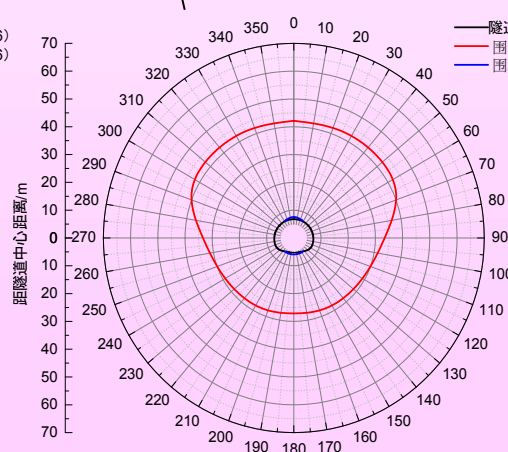
2 隧道围岩结构及其荷载效应



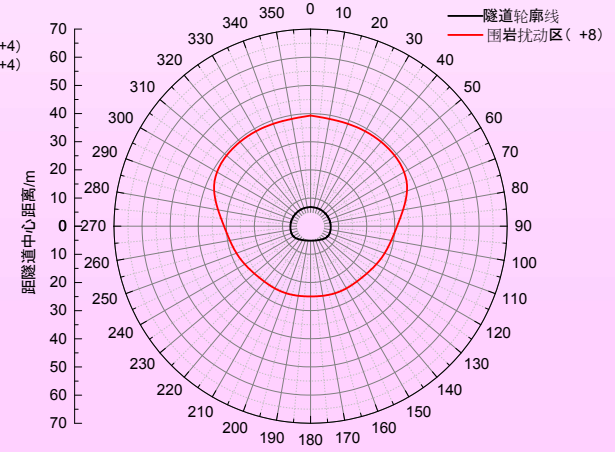
隧道围岩初始状态



隧道破坏发展稳定



隧道产生超前破坏



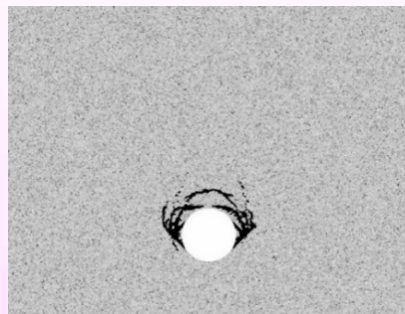
隧道产生超前扰动但并没有破坏



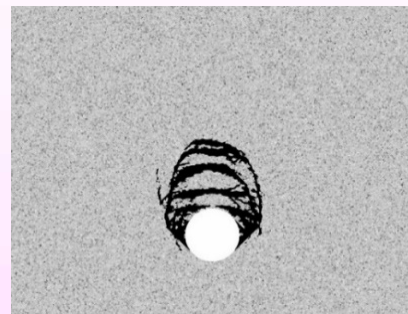
2 隧道围岩结构及其荷载效应

深层围岩的分组失稳特性

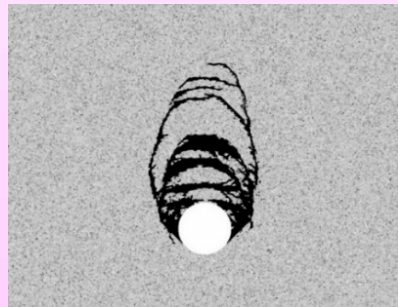
The grouping movement of external surrounding rock



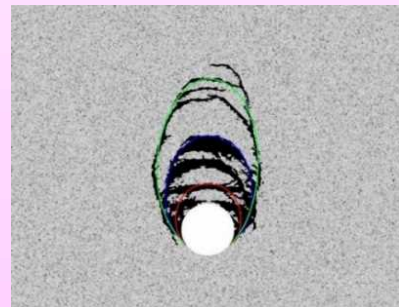
第一阶段



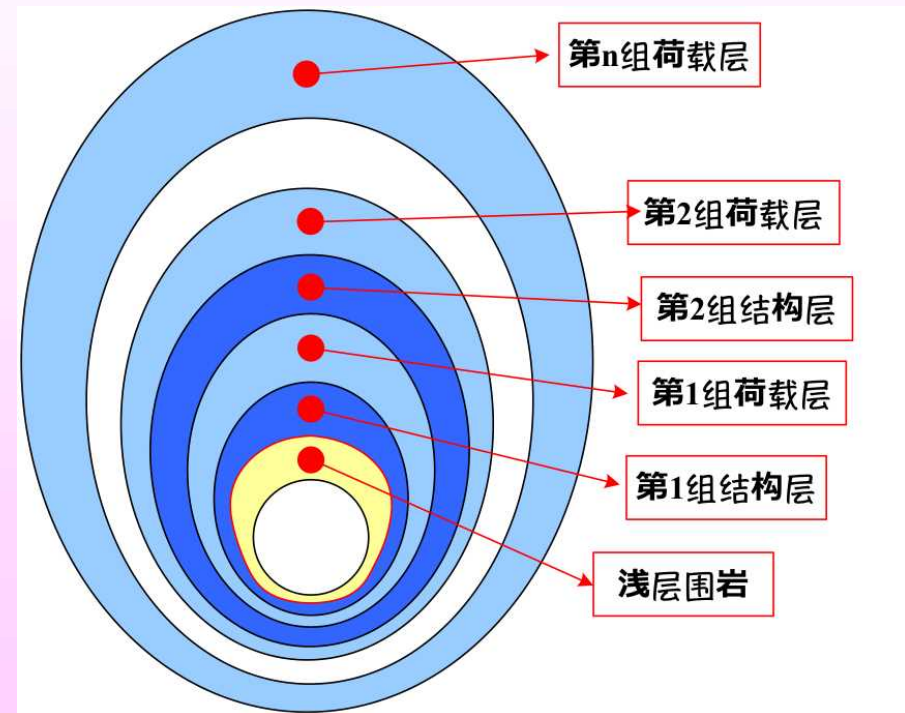
第二阶段



第三阶段



第四阶段



隧道围岩渐进破坏过程 Tunnel surrounding rock progressive failure process



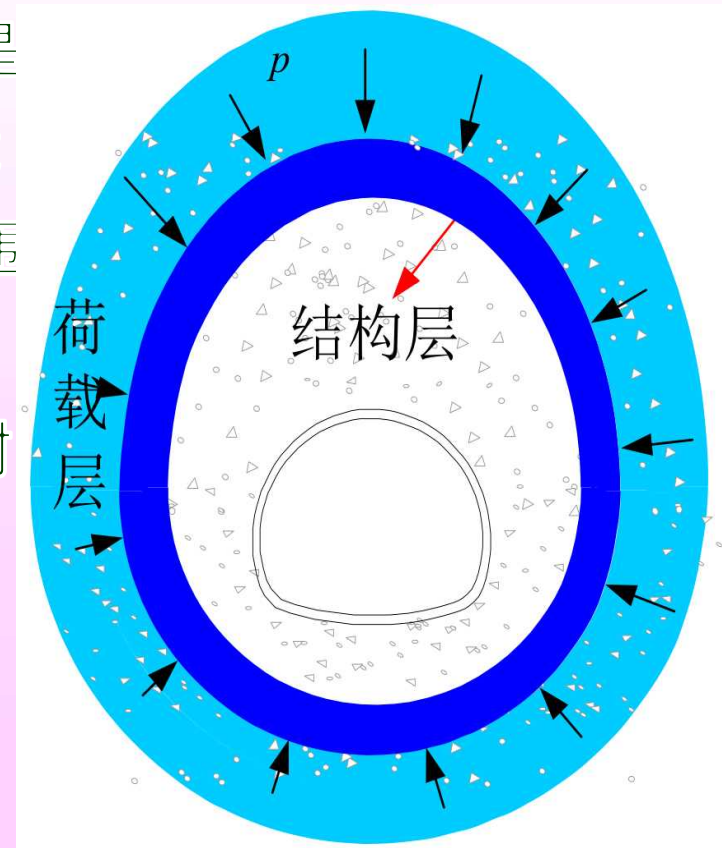
2 隧道围岩结构及其荷载效应

隧道围岩结构性的荷载效应：

Load effect of tunnel surrounding rock

隧道围岩的荷载效应其本质就是需要各种支护结构所分担的地层荷载，当然剩余的地层荷载全部由地层/围岩本身所承担。

这样，按照围岩结构性理论，对浅层围岩的荷载支护结构需全部承担；而对深层围岩的荷载则取决于对结构层变形的控制程度，变形控制越严则荷载越大，反之亦然。



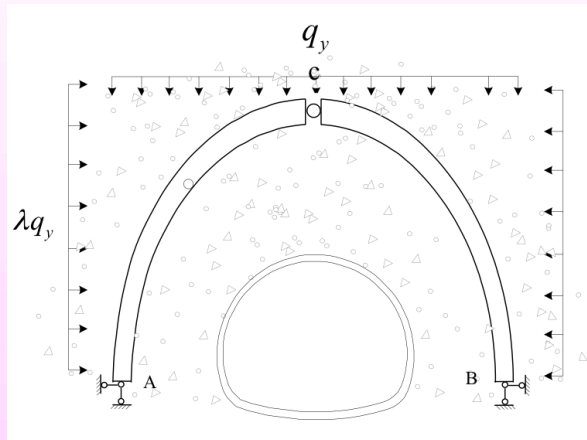


2 隧道围岩结构及其荷载效应

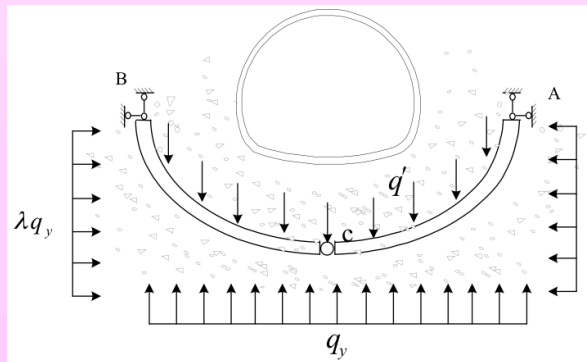
深层围岩结构层的稳定性:

Stability of tunnel external surrounding rock

结构层通常是由具有一定厚度和近似曲率的岩层构成，以拱腰为界，分别对上下围岩中的拱轴线进行分析：



$$\eta = \frac{a}{2b} = \frac{1}{2\sqrt{\lambda}}$$



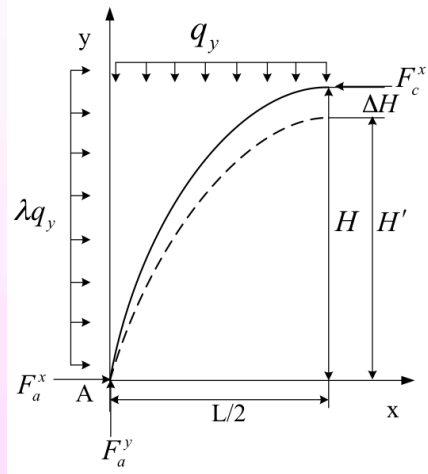
$$\eta = \frac{1}{2\sqrt{\lambda'}}$$



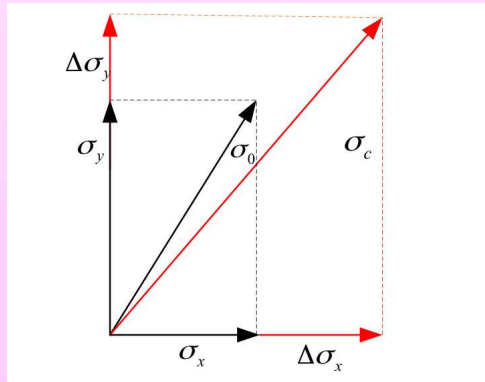
2 隧道围岩结构及其荷载效应

结构层的破坏模式和极限变形量：

Failure mode and ultimate deformation of structural layer



$$\Delta H_{1,\max} = \frac{-A_1 B_1 + \sqrt{B_1^2 D_1^2 - C_1^2 A_1^2 + C_1^2 D_1^2}}{B_1^2 + C_1^2}$$



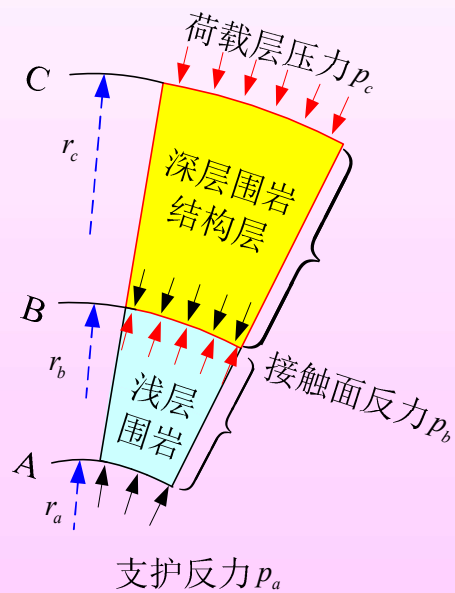
$$\Delta H_{2,\max} = \frac{-A_2 B_2 + \sqrt{B_2^2 D_2^2 - C_2^2 A_2^2 + C_2^2 D_2^2}}{B_2^2 + C_2^2}$$



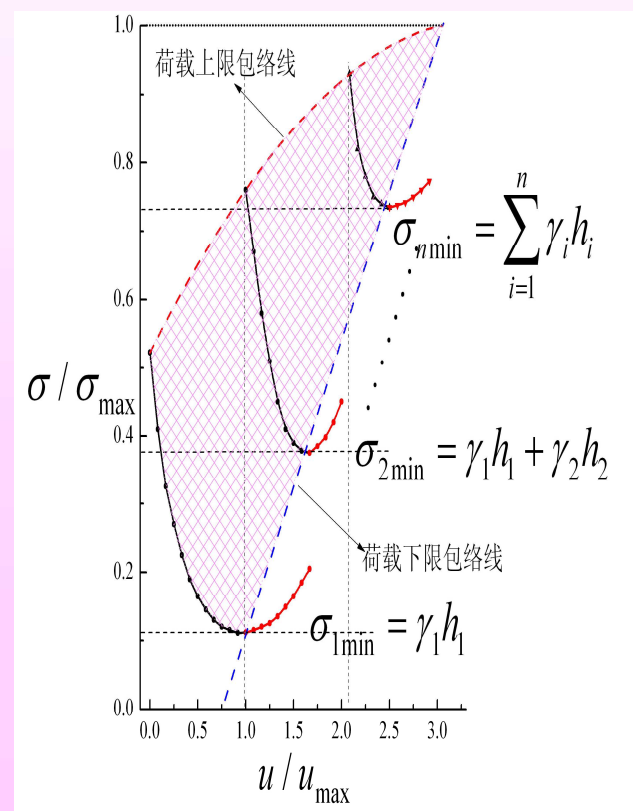
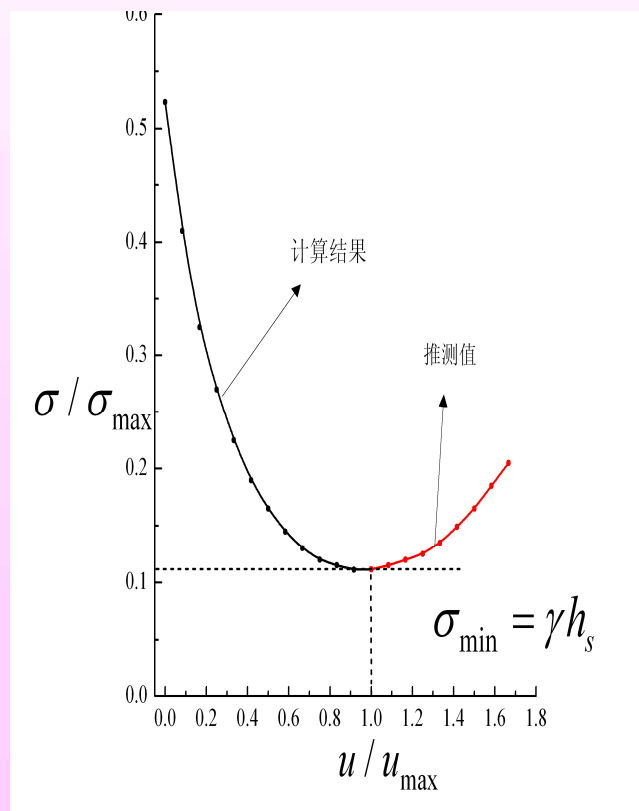
2 隧道围岩结构及其荷载效应

围岩结构的荷载效应：*Loading effect*

隧道围岩荷载效应的本质就是为了维持围岩稳定所需要提的外部干预水平（能力），通常由两部分组成，即浅层围岩的“给定荷载”和深层围岩的“限定荷载”（形变压力）。



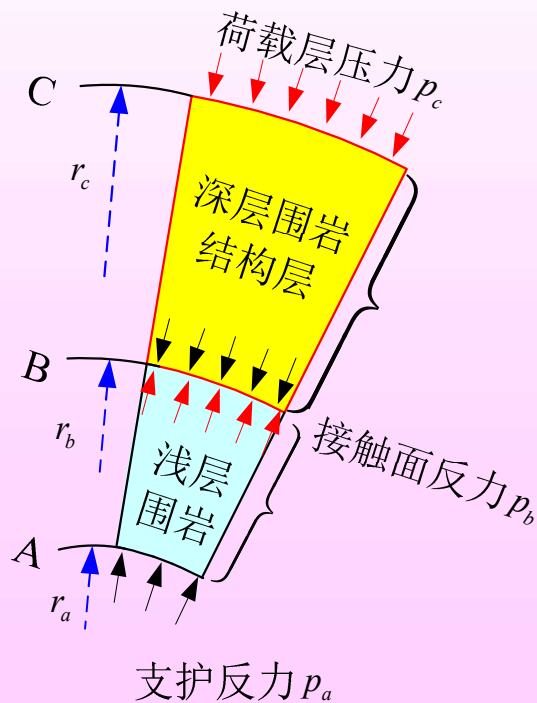
$$p = p_L + p_R = \gamma h + k_i s_i$$



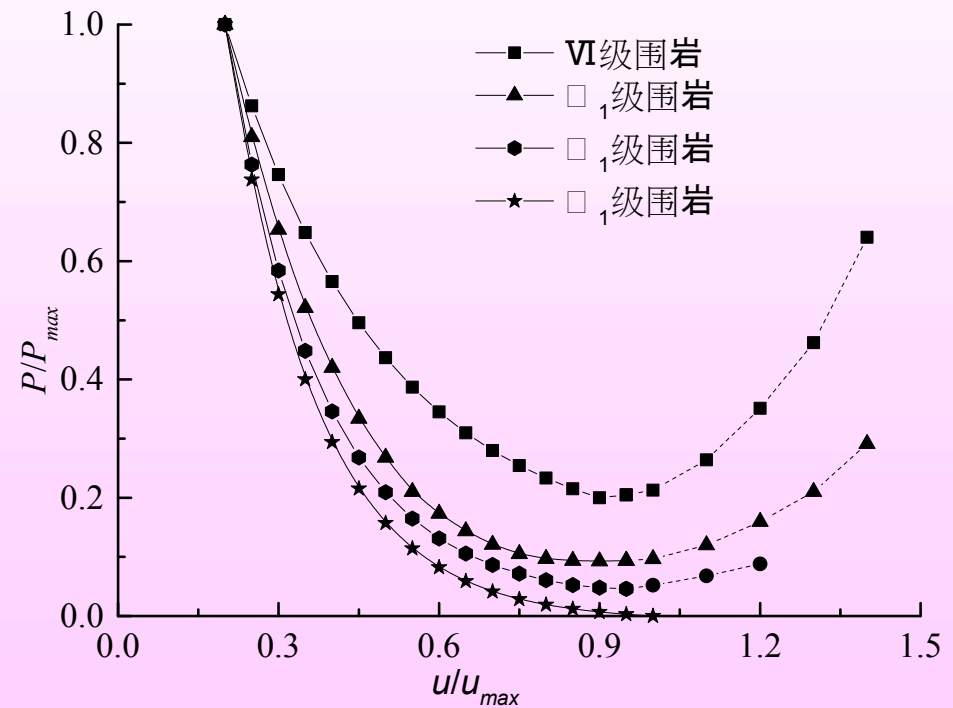


2 隧道围岩结构及其荷载效应

不同级别围岩的荷载效应：不同围岩的荷载不同，因而采取不同的支护方式、施工方法以及辅助施工方法。



围岩荷载计算模型



各级围岩特性曲线



3 复杂隧道围岩安全性及其评价方法

综合对各种安全事故的分析，就其本质而言，隧道建设安全事故的形成机制可分为三种模式：

1

围岩失稳(*Surrounding rock instability*):

由于隧道围岩失稳，造成隧道塌方、冒顶，或者由于隧道围岩的过度变形使隧道满足不了使用功能的需求。

2

结构失效(*Structural failure*):

隧道支护结构不足以抵抗围岩荷载，从而造成结构破坏，或在分部施工的力学转换过程中造成支护结构失效。

3

环境失调(*Environmental disruption*):

由于隧道施工引起地层的变形与破坏，必然波及到周边环境，由此造成环境结构与地层之间协调性的破坏。



3 复杂隧道围岩安全性及其评价方法

在极不稳定围岩中进行隧道施工，极易发生安全事故：



(4) 初期支护变形过大



(3) 初期支护失稳破坏



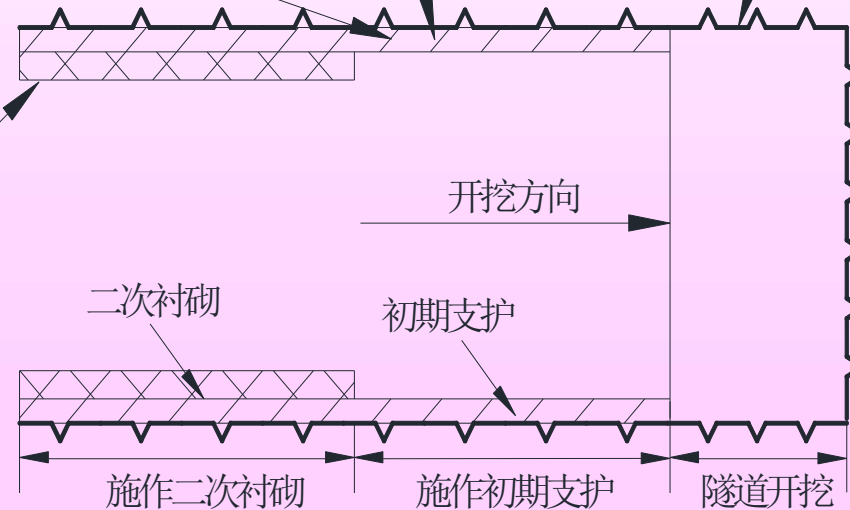
(2) 隧道塌方冒顶



(1) 掌子面发生破坏



(5) 二次衬砌开裂



典型安全事故

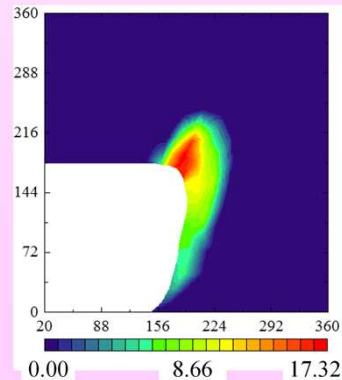
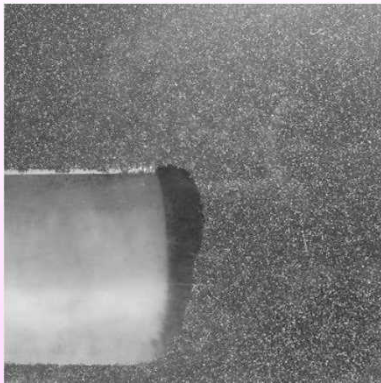


3 复杂隧道围岩安全性及其评价方法

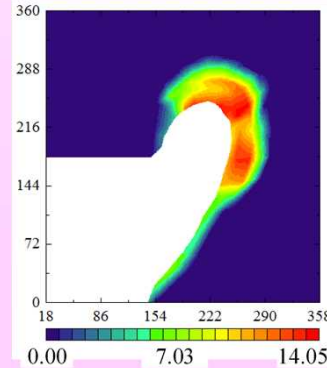
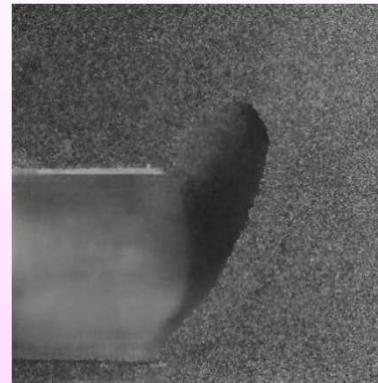
围岩超前破坏形态 *Advanced failure mode of surrounding rock*

三种典型模式，即**正面挤出型**、**前倾式冒落型**和**后倾式冒落型**，分别代表了不同围岩条件的工程影响，也决定了后续施工的安全水平。

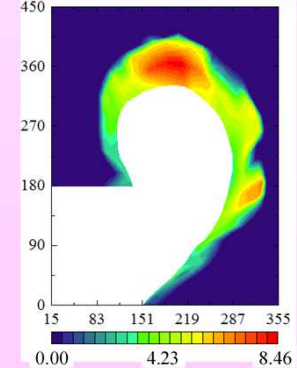
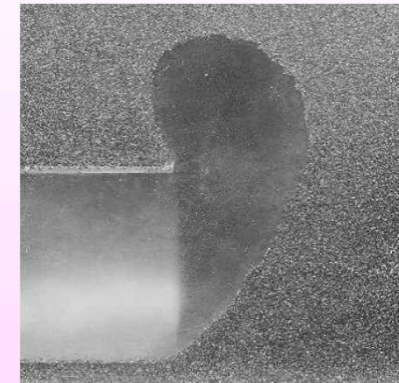
围岩破坏模式



正面挤出型破坏



前倾式冒落型破坏



后倾式冒落型破坏

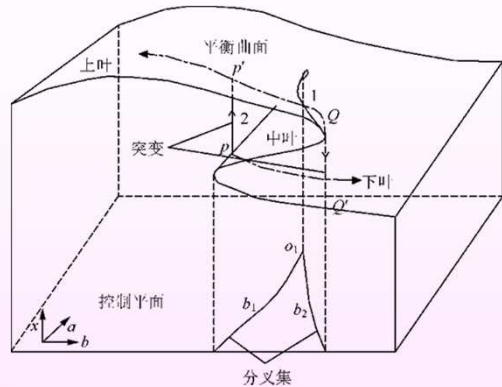


3 复杂隧道围岩安全性及其评价方法

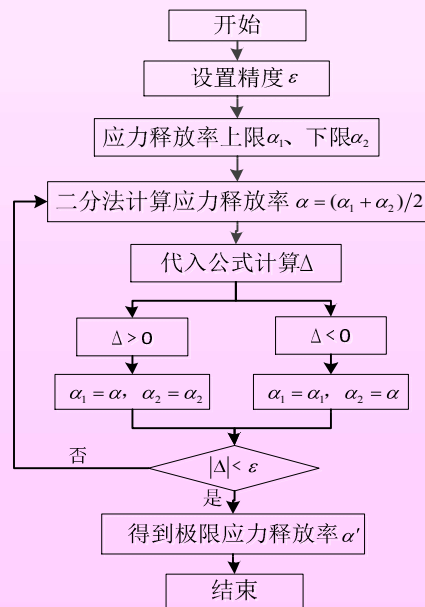
围岩超前破坏范围的预测方法

Prediction method of failure zone of surrounding rock

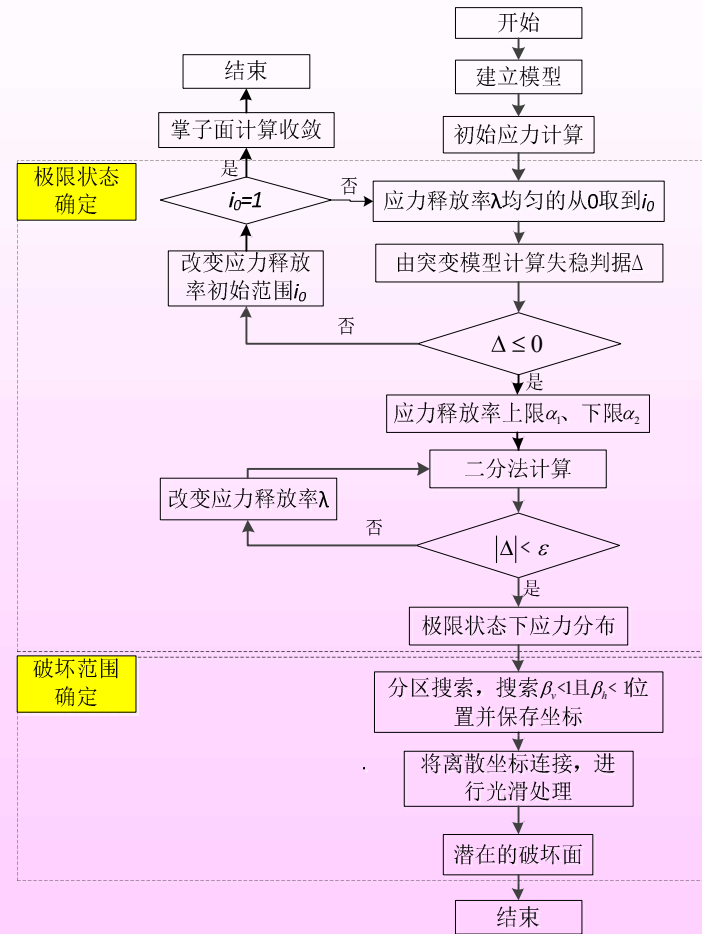
尖点突变模型



二分法计算流程



分区搜索路径



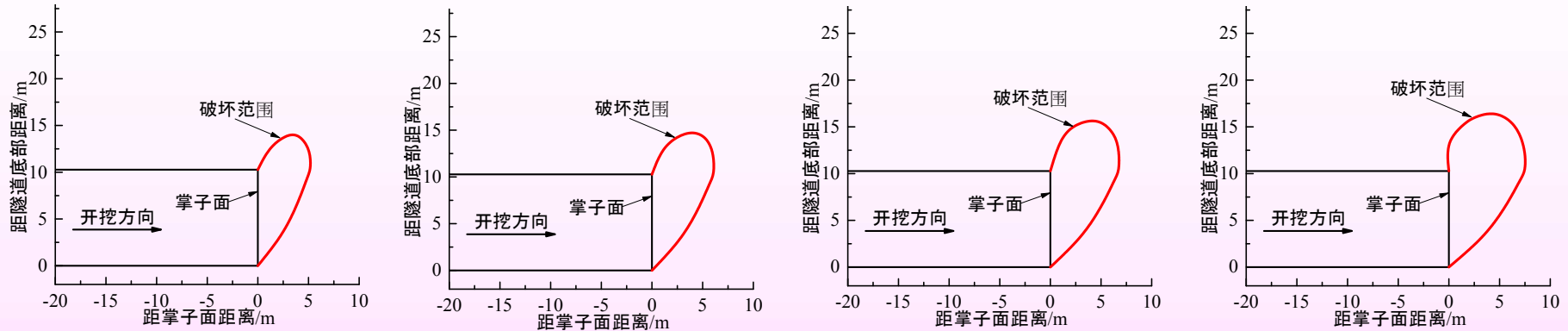
分析计算流程



3 复杂隧道围岩安全性及其评价方法

围岩参数对围岩超前破坏的影响(以重度为例)

Influence of surrounding rock parameters on advanced failure of surrounding rock



15 $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$

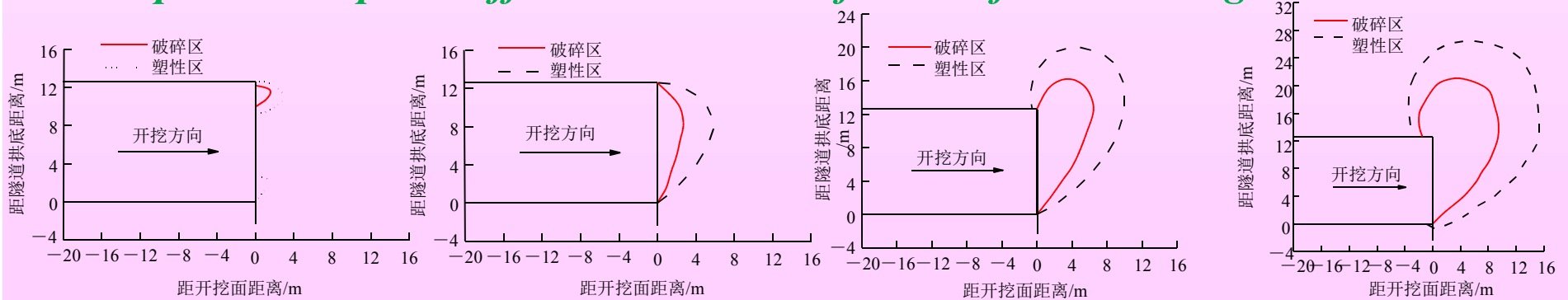
20 $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$

25 $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$

30 $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$

围岩超前破坏的时空效应(以释放率为例)

Temporal and spatial effects on advanced failure of surrounding rock



60%

70%

80%

87.6%

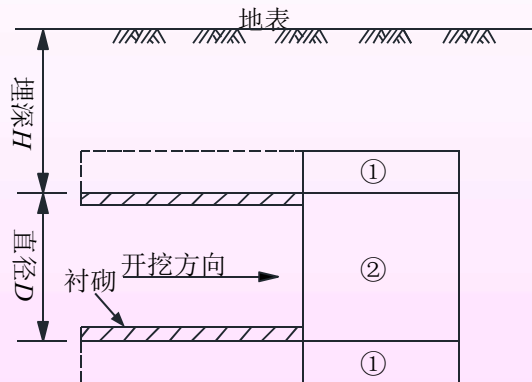


3 复杂隧道围岩安全性及其评价方法

辅助施工措施对围岩超前破坏的影

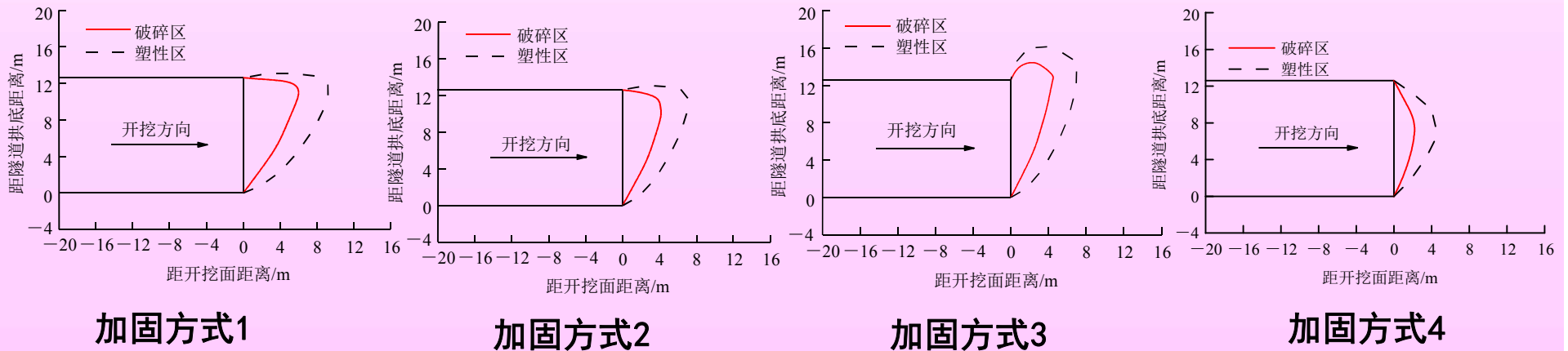
Influence on auxiliary construction measures in advanced failure of surrounding rock

预注浆加固



加固方式 1: 帷幕注浆, 只对①加固。
 加固方式 2: 帷幕注浆, ①, ②同时加固, ②比①参数弱。
 加固方式 3: 正面注浆, 只对②加固。
 加固方式 4: 全断面注浆, ①, ②同时加固, 且加固参数相同。

以加固方式为例进行分析



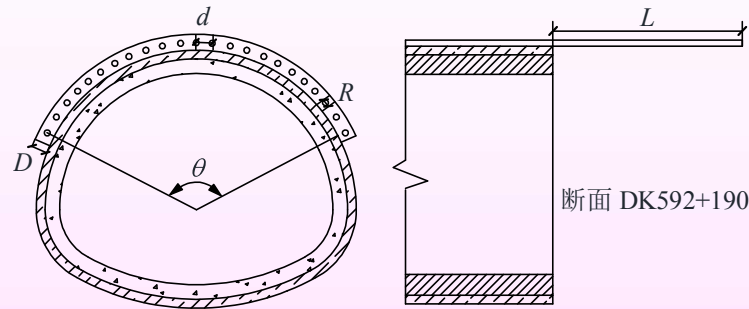


3 复杂隧道围岩安全性及其评价方法

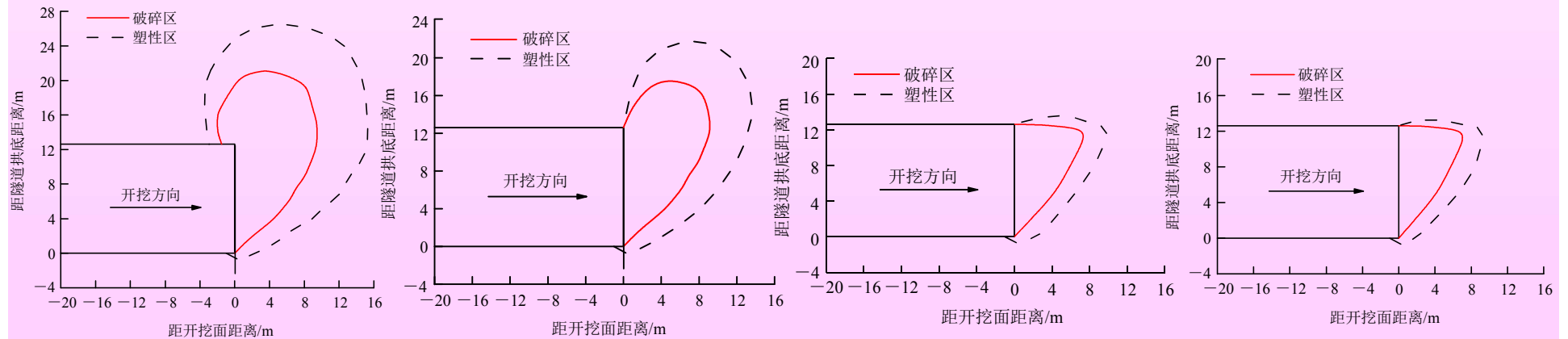
辅助施工措施对围岩超前破坏的影

Influence on auxiliary construction measures in advanced failure of surrounding rock

管棚加固



以管棚长度为例进行分析



无管棚

管棚长度7.5m

管棚长度15m

管棚长度22.5m

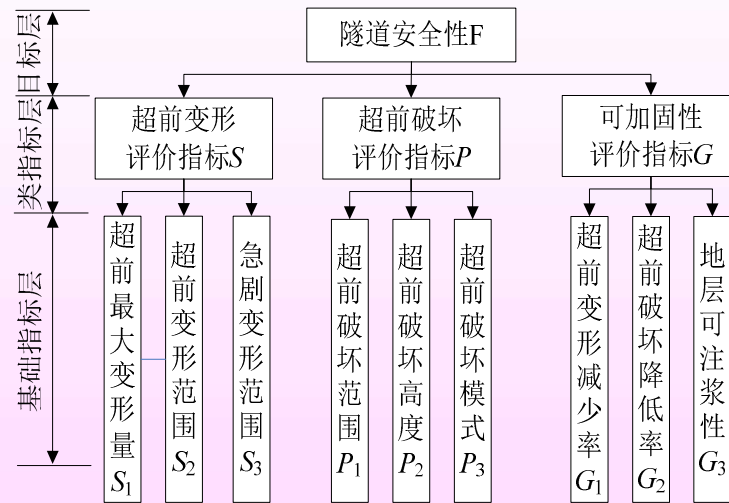


3 复杂隧道围岩安全性及其评价方法

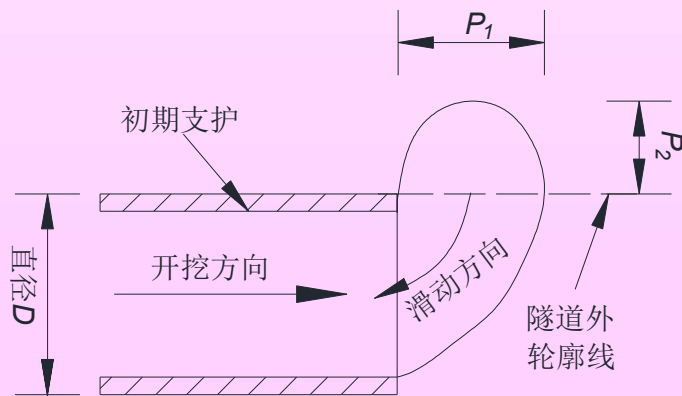
根据上述分析结果，以**围岩超前变形**、**围岩超前破坏**和**围岩有效性**三个指标表征复杂围岩的安全性，相应的评价指标如下：

评价指标体系

Evaluation index system

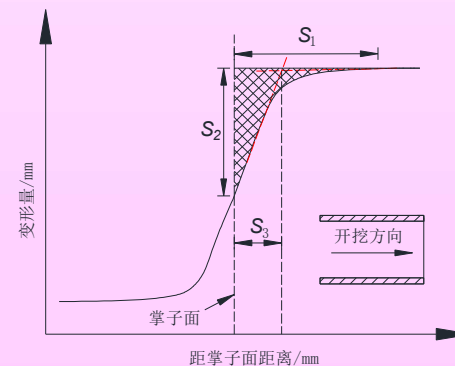


围岩超前破坏



Advanced failure of surrounding rock

围岩超前变形



Advanced deformation of surrounding



3 复杂隧道围岩安全性及其评价方法

指标评价体系权重的确定

Determination of weights of index evaluation system

采用层次分析法（简称AHP）确定各个评价指标的权重：

类指标	权重值	基础指标	权重值
超前破坏范围S	0.40	S ₁	0.5396
		S ₂	0.1634
		S ₃	0.2970
围岩超前变形范围P	0.40	P ₁	0.2000
		P ₂	0.4000
		P ₃	0.4000
预加固措施控制效果D	0.20	G ₁	0.2000
		G ₂	0.4000
		G ₃	0.4000

安全度的分析与计算

根据模糊数学理论，可将安全度定义为：

$$F = K \cdot B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix}$$

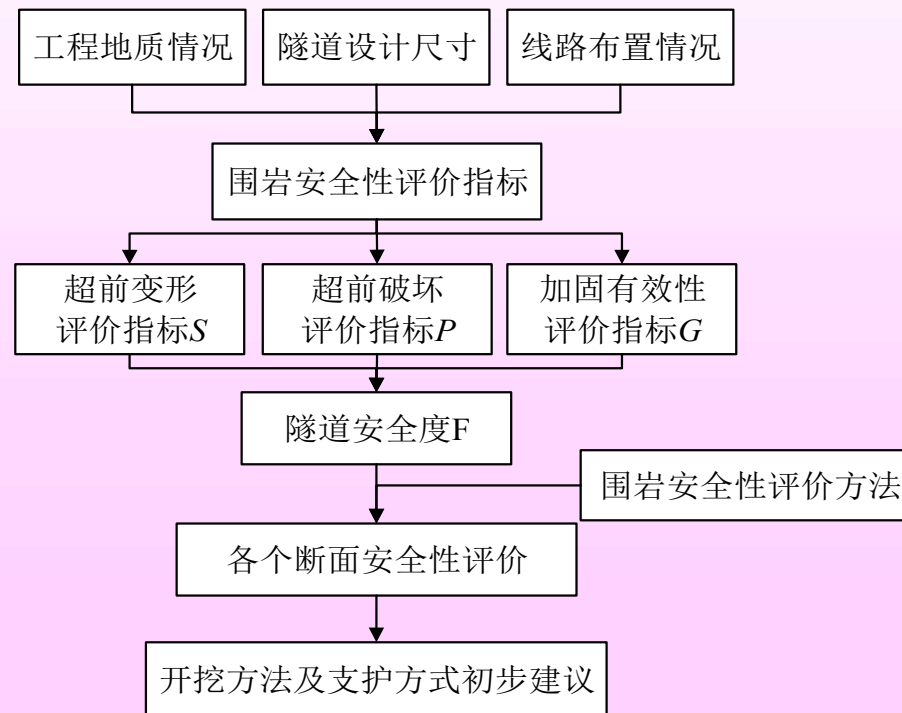


3 复杂隧道围岩安全性及其评价方法

极不稳定围岩安全性分级方法：

The classification method of rock safety in extremely unstable surrounding rock

结合地层、环境与工程特点，以安全性为主体目标将极不稳定稳定围岩依次分为A、B和C三个等级，用以表征围岩的安全性，其中A级围岩的安全性相对较好，B级次之，C级围岩的安全性最差。



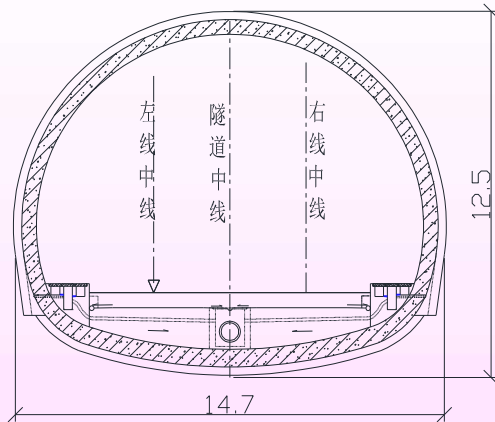
极不稳定围岩安全性分级方法



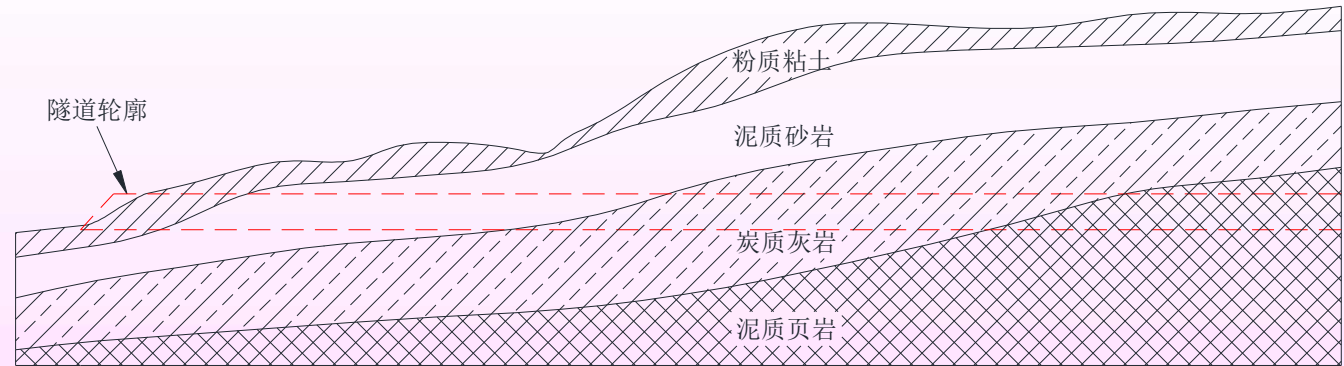
3 复杂隧道围岩安全性及其评价方法

工程概况

The general situation of Engineering



贺街隧道断面图



隧道工程地质剖面图

土层物理力学参数

土层名称	重度/ $(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	弹性模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/ $(^\circ)$
粉质粘土	19.9	13.25	0.36	25.79	15.4
泥质砂岩 (全风化)	20.2	130.4	0.33	20.55	28.6
炭质灰岩 (弱风化)	26	1200	0.3	30.6	32.0
泥质页岩 (弱风化)	26.5	1600	0.3	54.2	36.0



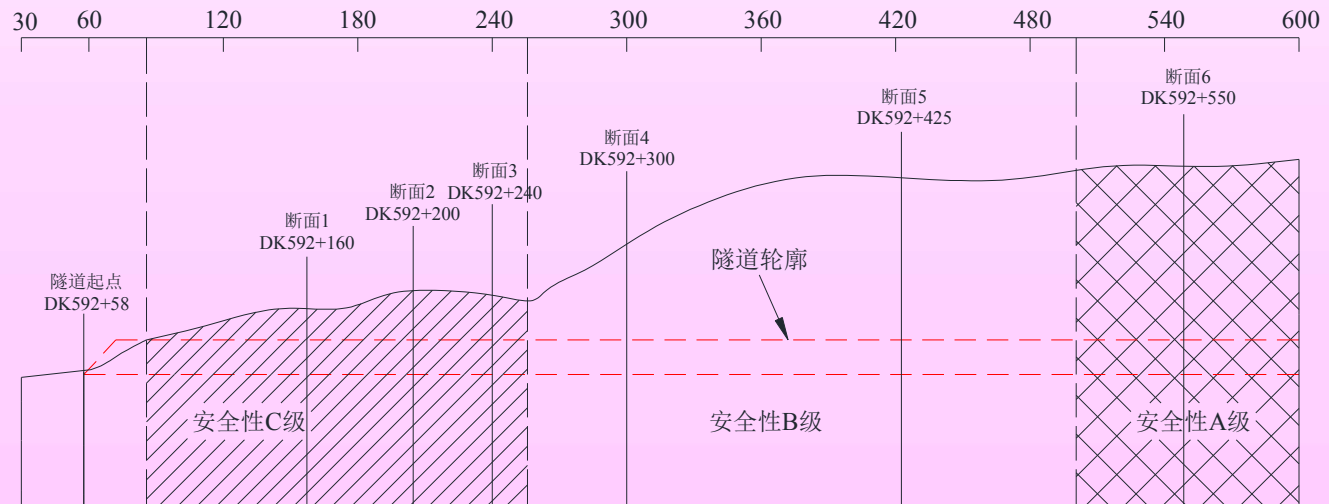
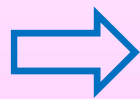
3 复杂隧道围岩安全性及其评价方法

不同断面围岩安全性分级结果

The classification results of surrounding rock safety in different sections

序号	里程	分级指标									安全性级别
		S_1	S_2	S_3	P_1	P_2	P_3	G_1	G_2	G_3	
断面1	DK592+160	0.022D	1.2D	0.48D	0.63D	0.81D	III类破坏	63%	79%	1.5m	C
断面2	DK592+200	0.028D	1.3D	0.53D	0.68D	0.91D	III类破坏	56%	71%	1.2m	C
断面3	DK592+240	0.032D	1.4D	0.56D	0.71D	0.94D	III类破坏	53%	62%	1.3m	C
断面4	DK592+300	0.012D	1.1D	0.61D	0.36D	0.52D	II类破坏	79%	81%	1.8m	B
断面5	DK592+425	0.006D	0.9D	0.62D	0.28D	0.51D	II类破坏	86%	84%	1.8m	B
断面6	DK592+550	0.002D	0.6D	0.32D	0.02D	0.16D	I类破坏	88%	86%	1.8m	A

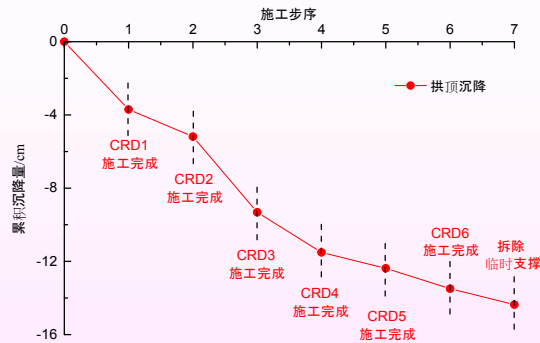
研究区段内围岩
安全性分级结果



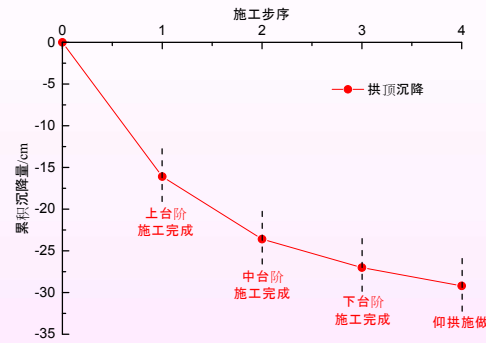


3 复杂隧道围岩安全性及其评价方法

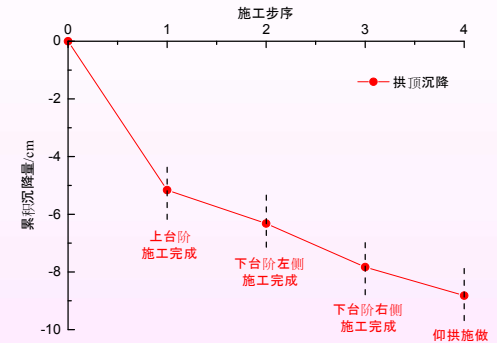
安全分级工程应用效果: The efficiency of classification method of safety



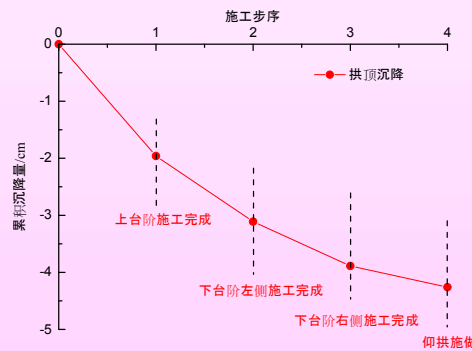
断面DK592+160监测数据



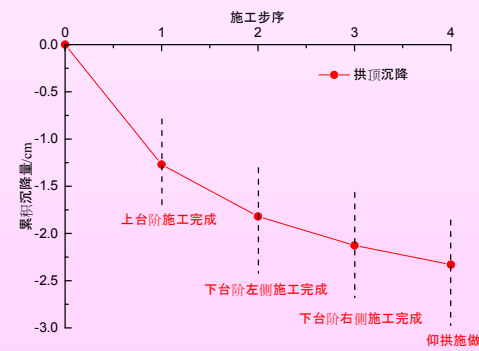
断面DK592+200监测数据



断面DK592+220监测数据



断面DK592+400监测数据



断面DK592+550监测数据

由工程实际效果及拱顶沉降监测结果，本项目所提出的围岩安全性分级结果符合工程实际情况，**A、B级围岩**相对容易控制，**C级围岩**容易发生塌方冒顶及变形过大现象，施工中应重点加以控制。



4 隧道支护与围岩的动态作用

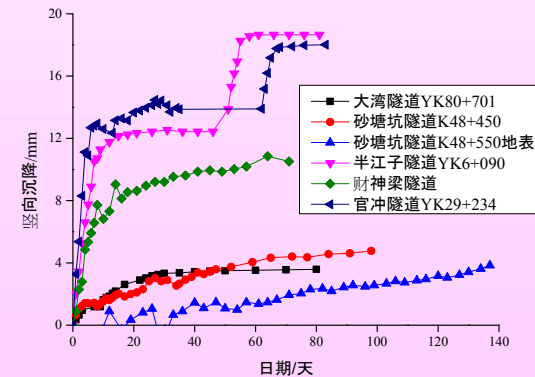
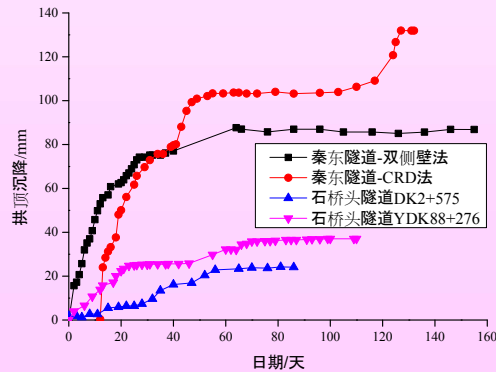
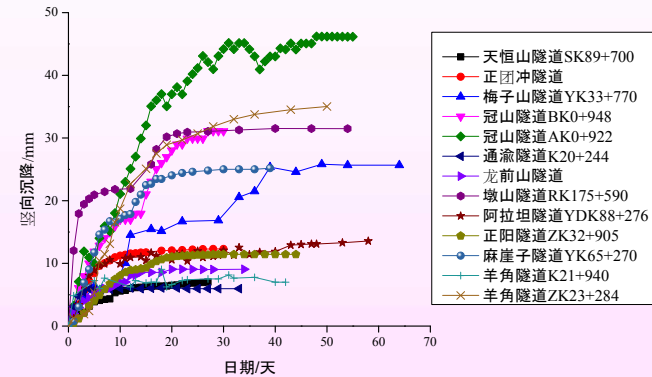
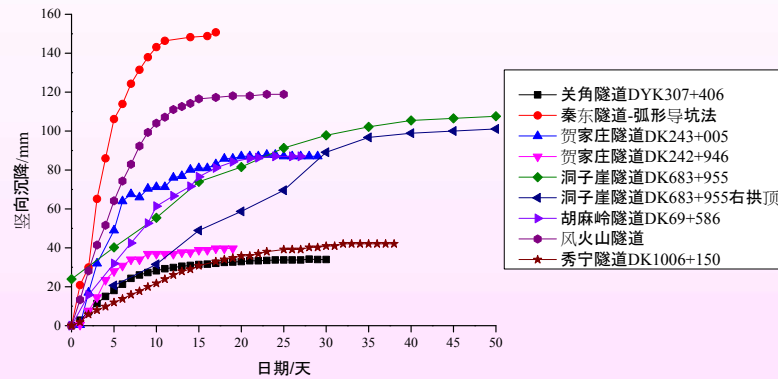
“围岩-支护”作用关系是隧道设计理论研究的**核心问题**，隧道工程中诸多关键问题的解决均有赖于对这一问题认识的深入。

由于对隧道施工影响下围岩变形特性以及超前支护、初期支护结构和二次衬砌结构作用机理的认识仍不够清晰，尤其对其作用过程缺乏系统的描述。



4 隧道支护与围岩的动态作用

隧道围岩变形的监测数据包含了隧道施工力学演化的最全面信息，是分析支护-围岩相互作用的最直观指标。



铁路隧道围岩变形历时曲线

公路隧道围岩变形历时曲线



4 隧道支护与围岩的动态作用

隧道支护-围岩动态相互作用的基本特点：

Basic characteristics of interaction between tunnel support and surrounding rock

(1) 动态性。 支护与围岩的相互作用关系具有很强的时空相关性，主要来源于隧道开挖及支护结构的施作过程、围岩的流变特性和混凝土材料的硬化特性。

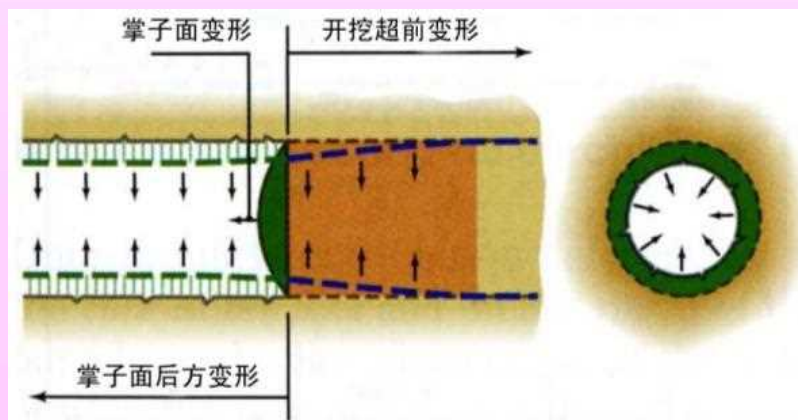
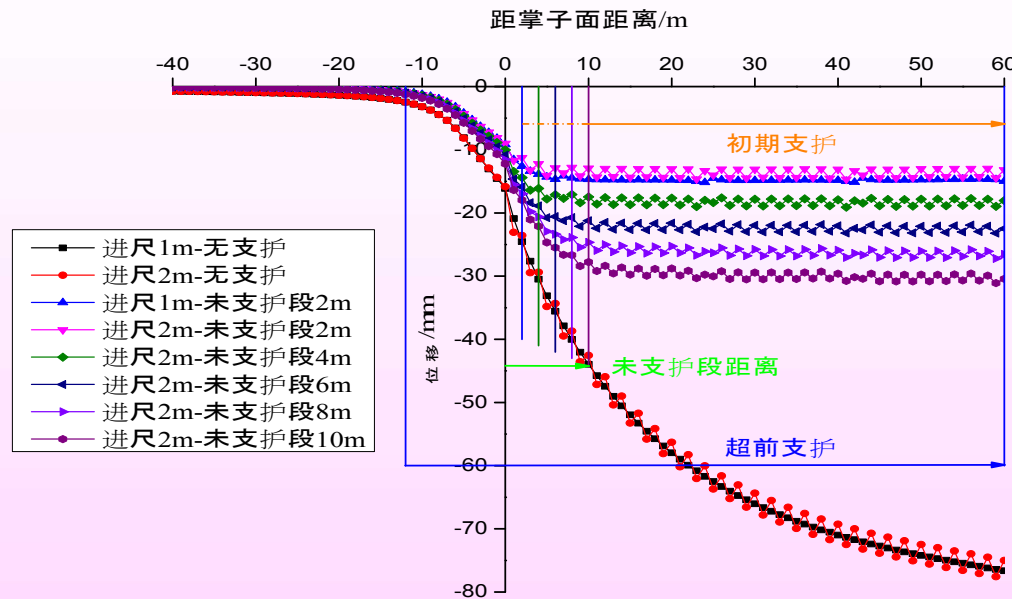
(2) 阶段性。 支护-围岩体系不同阶段的主导因素不尽相同，导致重点问题和相应的核心变量始终处于动态转移和相互转化之中。

(3) 统一性。 支护与围岩作为一个整体：支护结构承载一部分因应力释放而产生的荷载，防止围岩坍塌破坏、控制围岩变形；围岩荷载反作用于支护，要求支护具有足够的强度和刚度。



4 隧道支护与围岩的动态作用

Support method and related surrounding rock deformation



支护结构的核心作用是控制不同阶段围岩变形的发展，各种支护结构作为协同作用的整体，在支护结构体系形成的全过程中互相配合、合理分工，前序施作的结构是后序结构设计的基础，而后序结构的力学特性也决定了对先期结构的要求。



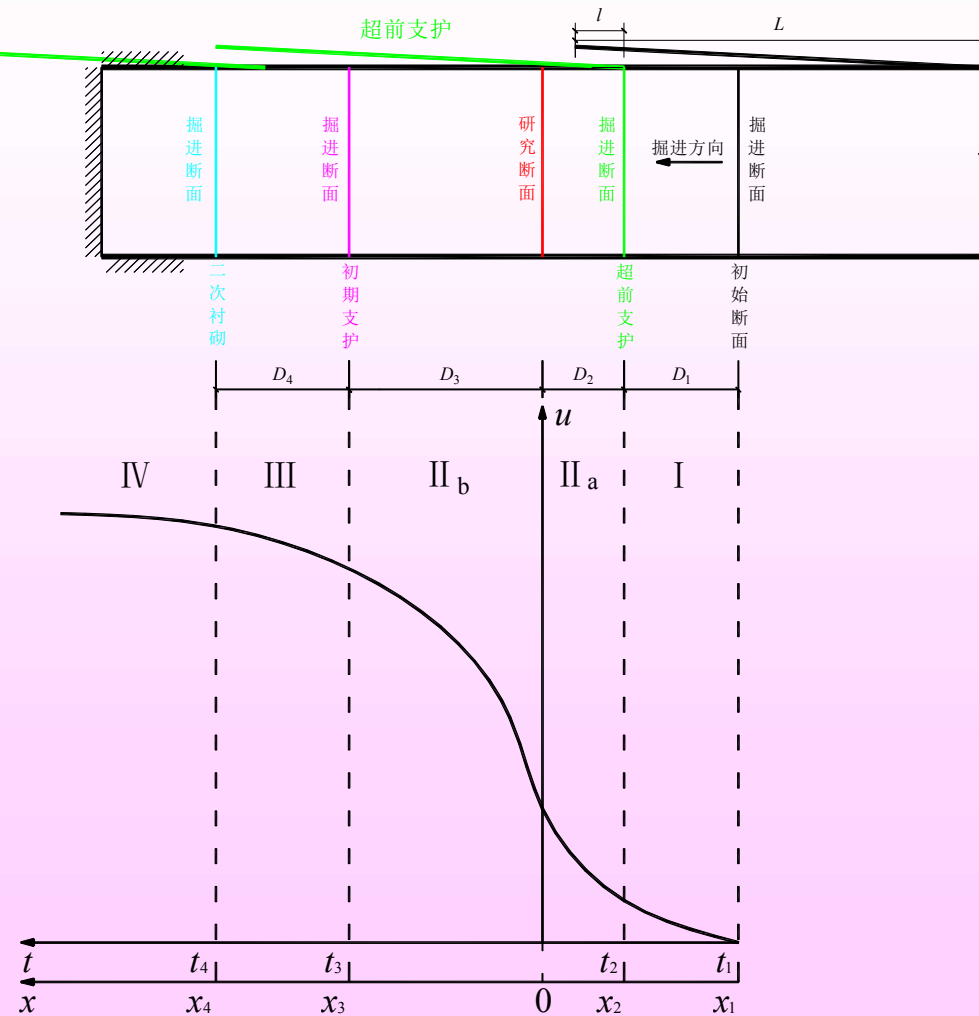
4 隧道支护与围岩的动态作用

■ 三界面 Three interfaces

- ✓ 超前支护发挥作用
- ✓ 初期支护发挥作用
- ✓ 二次衬砌发挥作用

■ 四阶段 Four stages

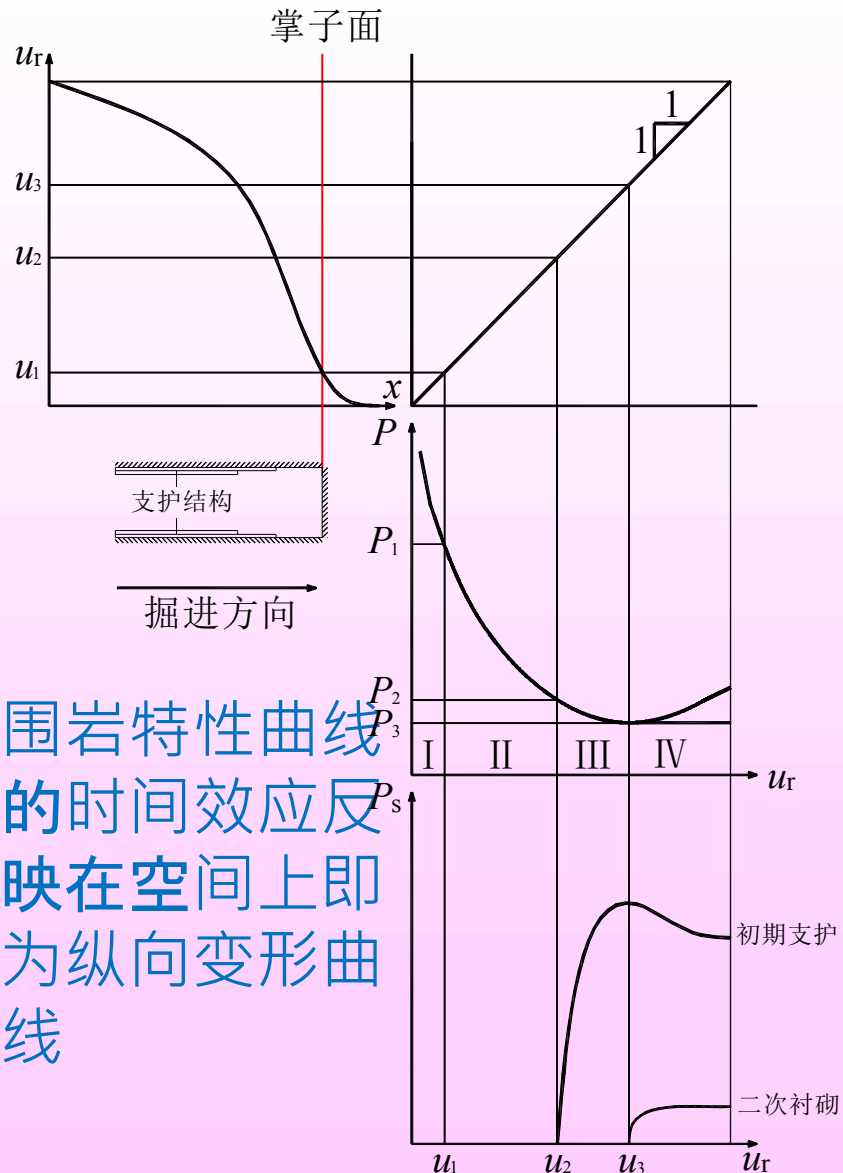
- I : 围岩受开挖影响较小
- II : 超前支护防止围岩坍塌
- III : 初期支护控制围岩变形
- IV : 二次衬砌提高安全储备



隧道开挖过程中研究断面的变形时空曲线



4 隧道支护与围岩的动态作用



围岩特性曲线的时间效应反映在空间上即为纵向变形曲线

■ 动态作用过程

Interaction process

I : 变_形缓慢发展 ;

II : 变_形开始加速, 预支

护发挥作用—**关键阶段**—
防止围岩失稳 ;

III : 变_形速度变缓, 初_期

支护发挥作用—**核心阶段**—
防止结构失效 ;

IV : 变_形趋于稳定, 二次衬
砌提_高安全储备



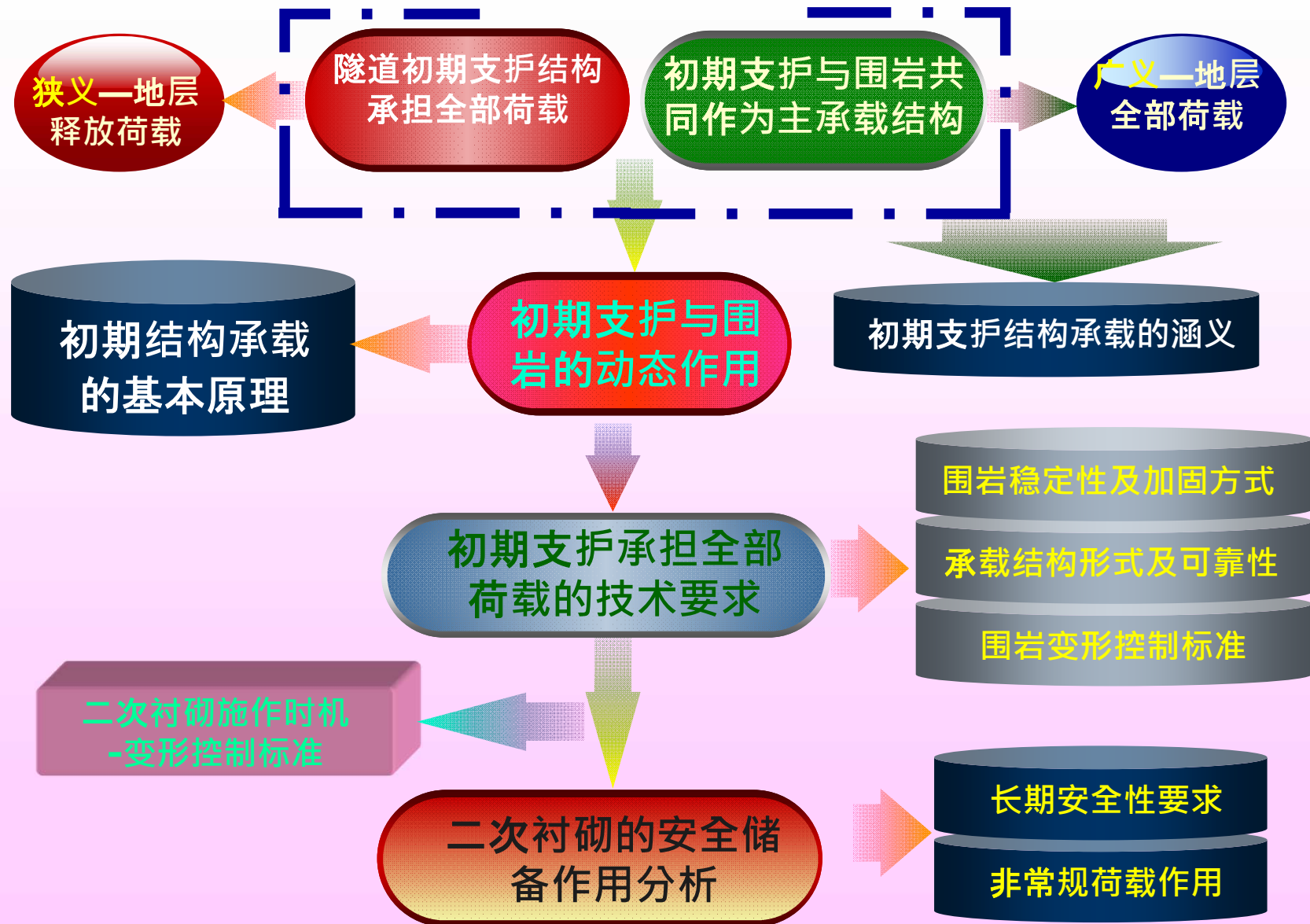
4 隧道支护与围岩的动态作用

隧道“围岩-支护”动态作用过程分析 *Analysis of interaction between 'surrounding rock and support'*

阶段	I	II	III	IV
作用阶段	自围岩受到开挖效应影响至超前支护发挥作用	自超前支护发挥作用至初期支护发挥作用	自初期支护发挥作用至二次衬砌发挥作用	自二次衬砌发挥作用至围岩-支护系统进入稳定状态
作用特点	由于围岩开挖效应的时空特性，掌子面前方一定范围内的围岩产生超前变形，且距离掌子面的距离与围岩变形速率成反比。	围岩的变形速率快速增大，隧道净空收敛快速增加。	围岩的变形速率逐渐减小，初期支护受力逐渐增大，围岩-支护系统逐渐趋于稳定。	初期支护与二次衬砌发挥协同作用，共同承担围岩荷载，提高了隧道结构的安全与可靠性。
关键问题	围岩复杂性决定了施工人员不可能通过前期勘查全面了解围岩的物理力学性质，导致地下工程施工安全性与开挖前预支护措施选择的合理性之间存在矛盾。	初期支护的施做总是需要一定时间的，不可能在围岩开挖后瞬间施做完成，因此，围岩自稳能力与初期支护结构力学参数及施做时机之间存在矛盾。	围岩应力重分布的发展规律及变形情况与初期支护结构支护能力之间的矛盾，决定了围岩-支护系统的稳定状态。	自稳能力差的软弱围岩及具有显著流变性质围岩与地下工程结构安全性之间的矛盾，决定了二次衬砌作为安全储备的必要性。
控制要点	掌子面前方超前核心土的稳定决定了隧道超前变形的控制效果，是此阶段施工控制的关键点	通过开挖揭示出的围岩实际情况、围岩变形实时监测情况及时调整施工、设计方案，合理确定初期支护结构的力学参数及支护时机。	该阶段围岩和初期支护的变形和受力监测数据能够综合反映围岩-支护系统的发展状态，若变形速率持续增加则应及时采取补强措施。	根据揭露围岩的物理力学性质和长期监测情况，合理确定二次衬砌的结构形式、设计参数和施做时机。



5 隧道支护结构的协同作用原理





5 隧道支护结构的协同作用原理

• 隧道支护的基本作用

Essential effects of tunnel support

调动围岩承载

- 隧道围岩加固
- 初喷混凝土
- 锚杆支护作用

协助围岩承载

- 隧道超前支护结构
- 隧道初期支护结构
- 隧道二次衬砌结构

围岩为主承载体

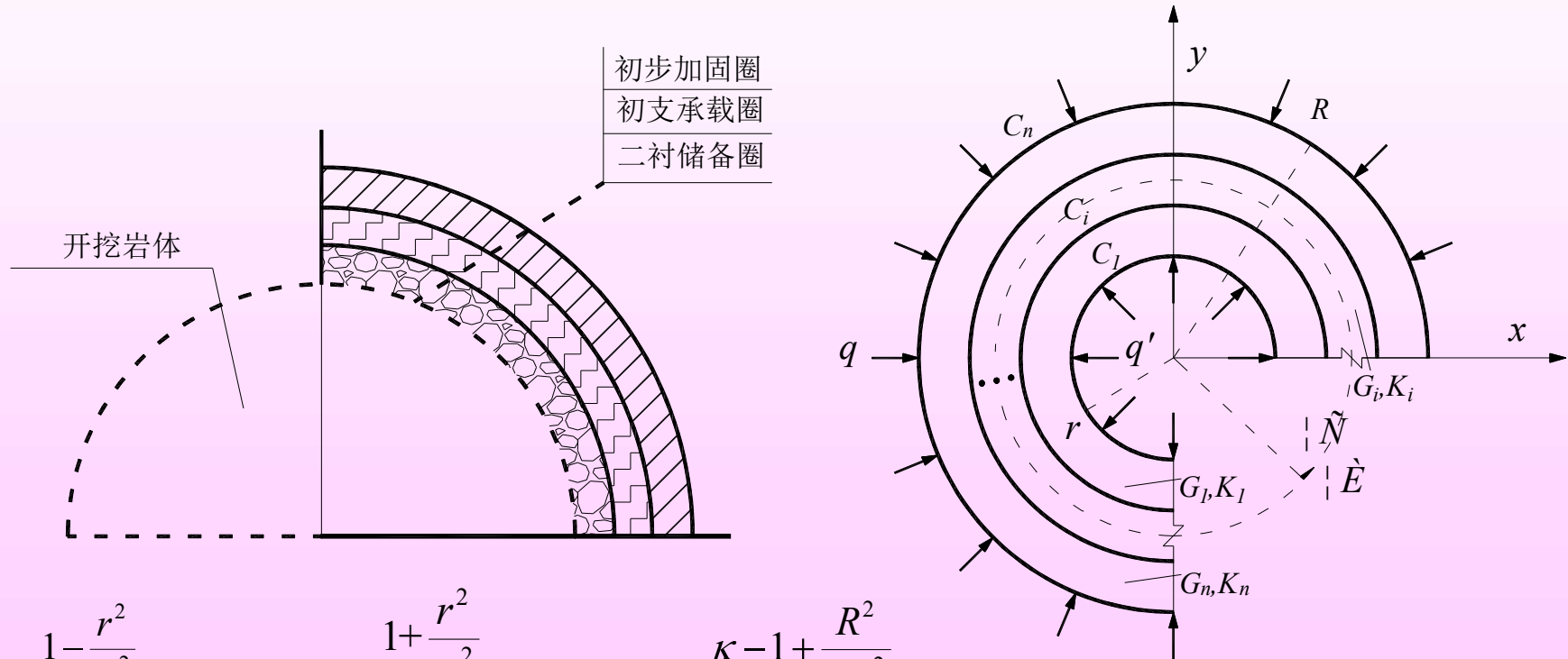


5 隧道支护结构的协同作用原理

隧道支护结构体系协同作用模型

Collaborative effect model of tunnel support system

隧道支护结构的协同作用机理：整体力学模型 + 多连通域复变函数求解。



$$\sigma_{\rho}^i = -\frac{1 - \frac{r^2}{\rho^2}}{1 - \frac{r^2}{R^2}} q$$

$$\sigma_{\theta}^i = -\frac{1 + \frac{r^2}{\rho^2}}{1 - \frac{r^2}{R^2}} q$$

$$u_{\rho}^i = -\frac{\kappa - 1 + \frac{R^2}{2\rho^2}}{1 - \frac{r^2}{R^2}} \frac{q}{G\rho}$$



5 隧道支护结构的协同作用原理

● 各类支护构件在支护过程中的作用机理

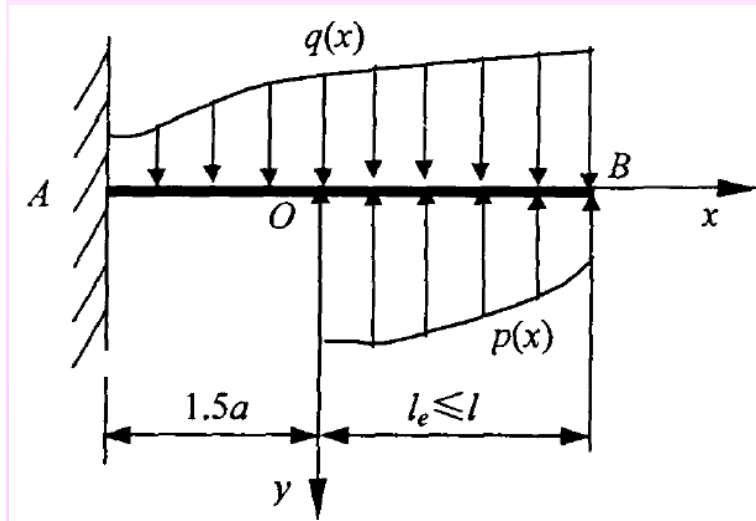
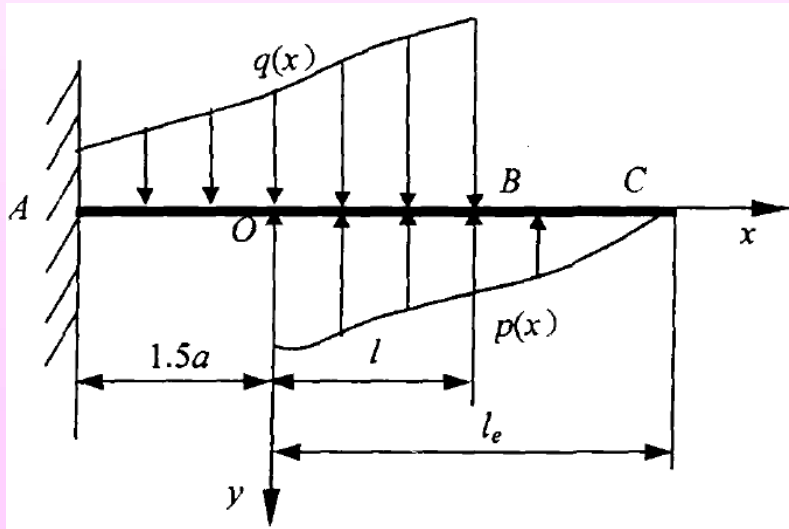
The mechanism of different tunnel support structures

超前支护：超前小导管、管棚、掌子面锚杆。

超前小导管：小导管的注浆加固机理和结构作用；

管棚：将上部集中荷载分散到掌子面前方的土体和格栅（钢）拱架上；

掌子面锚杆：提高核心土体强度、刚度，抑制掌子面水平位移。



超前支护作用机理的力学模型（超前支护长度 l_e ，地层超前松弛范围 l ）



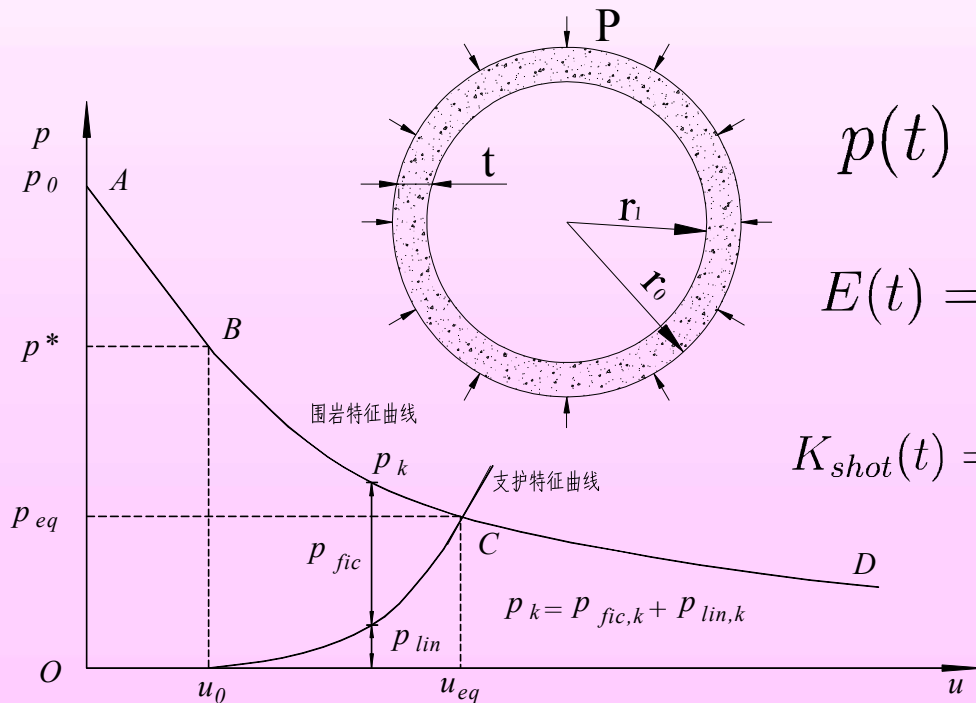
5 隧道支护结构的协同作用原理

● 各类支护构件在支护过程中的作用机理

The mechanism of different tunnel support structures

喷混凝土支护机理： 提出了考虑喷混凝土硬化特性的支护特性曲线。

为求得考虑喷砼硬化特性的支护特征曲线，首先要确定其围岩的应力释放规律，同时要知道得喷射混凝土弹性模量的时间变化规律。



$$p(t) = p_0 \cdot (1 - 0.7e^{-mt})$$

$$E(t) = E_0 [1 - \alpha e^{-mt} - (1 - \alpha)e^{-nt}]$$

$$K_{shot}(t) = \frac{(r_0^2 - r_1^2)}{(1 - \mu_0)r_0^2 + (1 + \mu_0)r_1^2} \cdot \frac{1}{r_0} \cdot E(t)$$



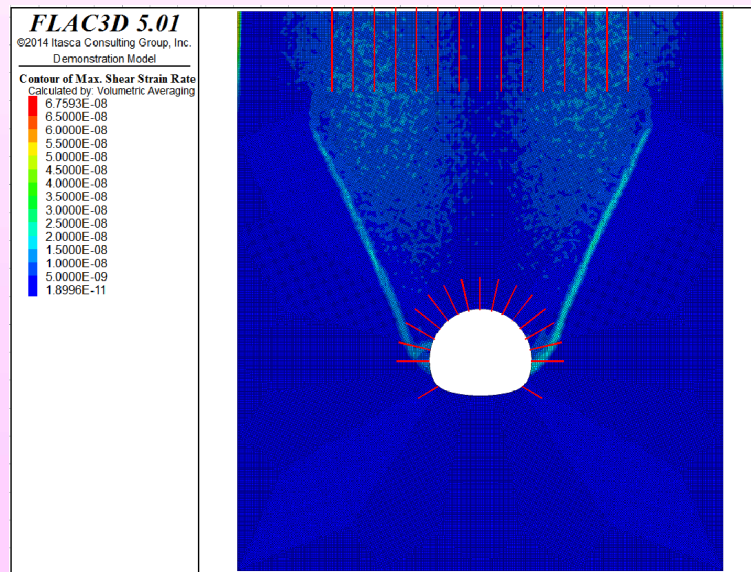
5 隧道支护结构的协同作用原理

● 各类支护构件在支护过程中的作用机理

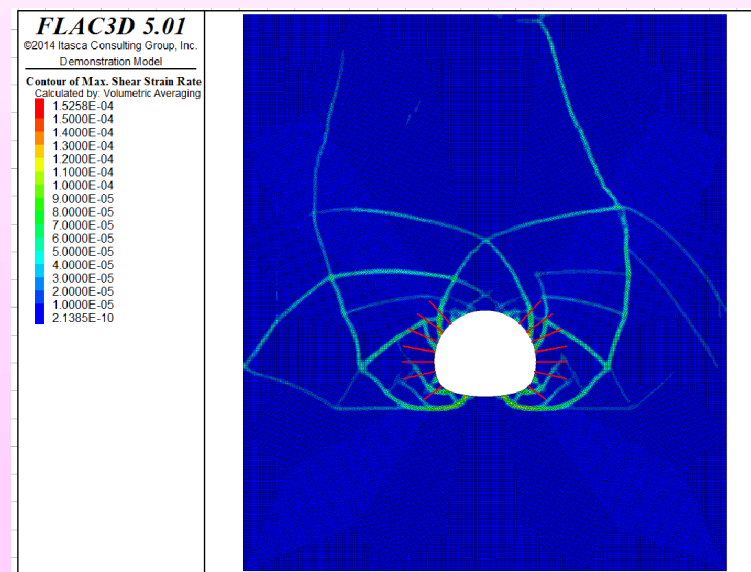
The mechanism of different tunnel support structures

锚杆的加固效果：约束软弱破碎围岩软化区域

分别考量在浅埋、深埋、偏压条件下软弱破碎围岩的破坏特点，并在此基础上针对薄弱环节给出相应的锚杆支护方案



a) 浅埋建议



b) 深埋建议

系统锚杆的布置建议



5 隧道支护结构的协同作用原理

● 各类支护构件在支护过程中的作用机理

The mechanism of different tunnel support structures

高速铁路隧道二次衬砌结构验算及安全储备作用：规范、实测荷载

规范：拱顶受力最不利；

实测：局部应力集中处。

实测安全系数普遍大于

规范荷载；

总体而言围岩级别对实

测荷载影响不大；

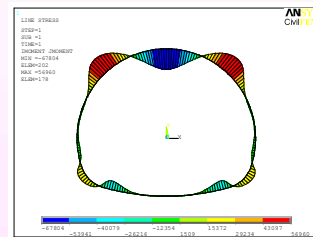
规范：各级围岩都存在

大偏心受压的情况；

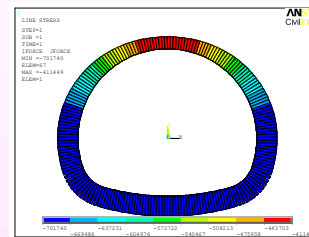
实测：除极个别测点，

安全性由混凝土的抗压

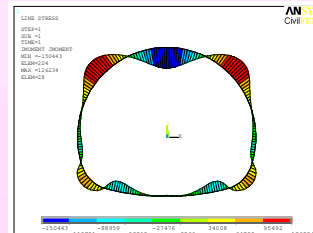
强度控制的。



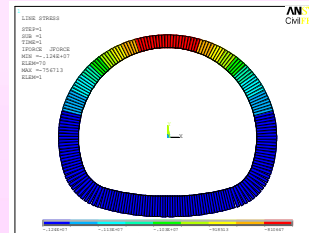
(1) III级弯矩(N-m)



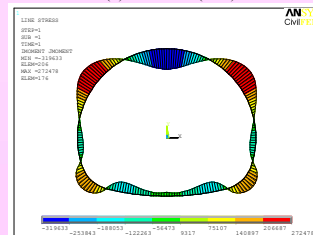
(2) III级轴力(N)



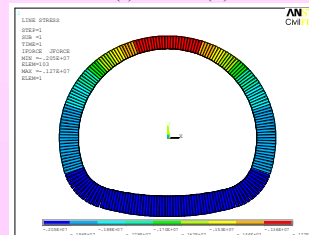
(3) IV级弯矩(N-m)



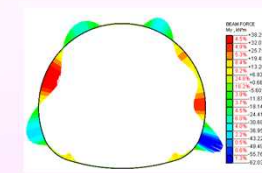
(4) IV级轴力(N)



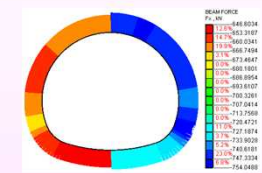
(5) V级弯矩(N-m)



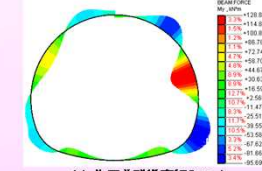
(6) V级轴力(N)



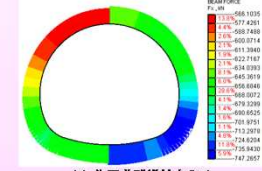
(1) 棋盘山隧道弯矩(kN-m)



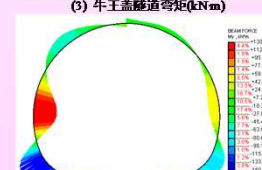
(2) 棋盘山隧道轴力(kN)



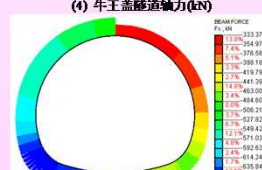
(3) 牛王盖隧道弯矩(kN-m)



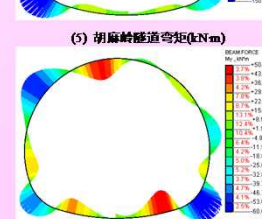
(4) 牛王盖隧道轴力(kN)



(5) 胡麻岭隧道弯矩(kN-m)



(6) 胡麻岭隧道轴力(kN)



(7) 金牛山隧道断面1弯矩(kN-m)



(8) 金牛山隧道断面1轴力(kN)

规范荷载

实测荷载



5 隧道支护结构的协同作用原理

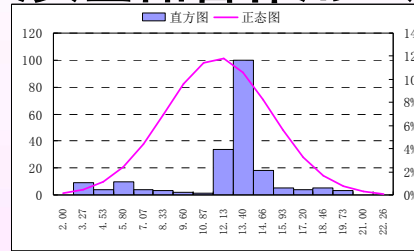
各类支护构件在支护过程中的作用机理

The mechanism of different tunnel support structures

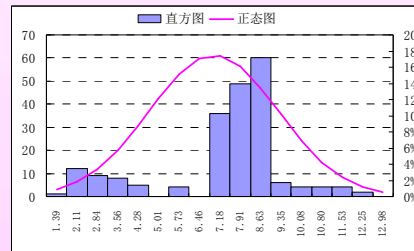
高速铁路隧道二次衬砌结构验算及安全储备作用：规范、实测荷载

初期支护承受全部荷载，二次衬砌作为安全储备的设计理念的提出及科学内涵：

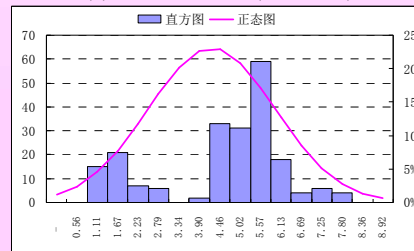
- 1、基于变形控制的设计理念，要求初期支护及其周边围岩变形稳定后才能施做二次衬砌，这是基本前提条件；
- 2、重视初期支护的施工质量控制，建立相应的初期支护质量检测评价体系；
- 3、强调超前支护的重要作用，在不良地质段可以通过超前支护改良地质条件，使初期支护能够或者更好的联合围岩承受全部荷载。



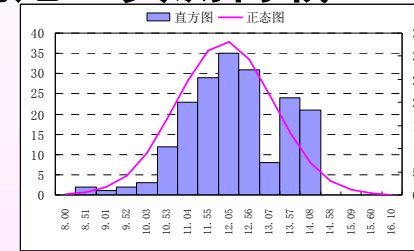
(1) □ 级围岩隧道 (规范荷载)



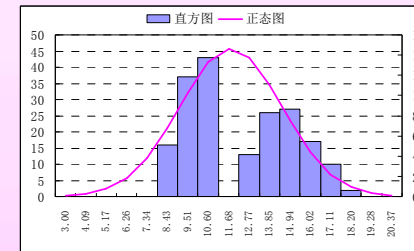
(3) □ 级围岩隧道 (规范荷载)



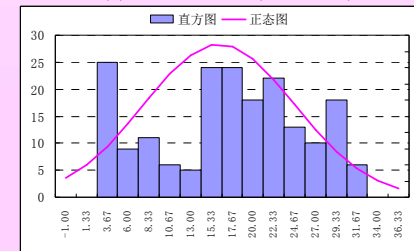
(5) □ 级围岩隧道 (规范荷载)



(2) 棋盘山隧道 (实测荷载)



(4) 牛王盖隧道 (实测荷载)



(6) 胡麻岭隧道 (实测荷载)

二次衬砌安全系数

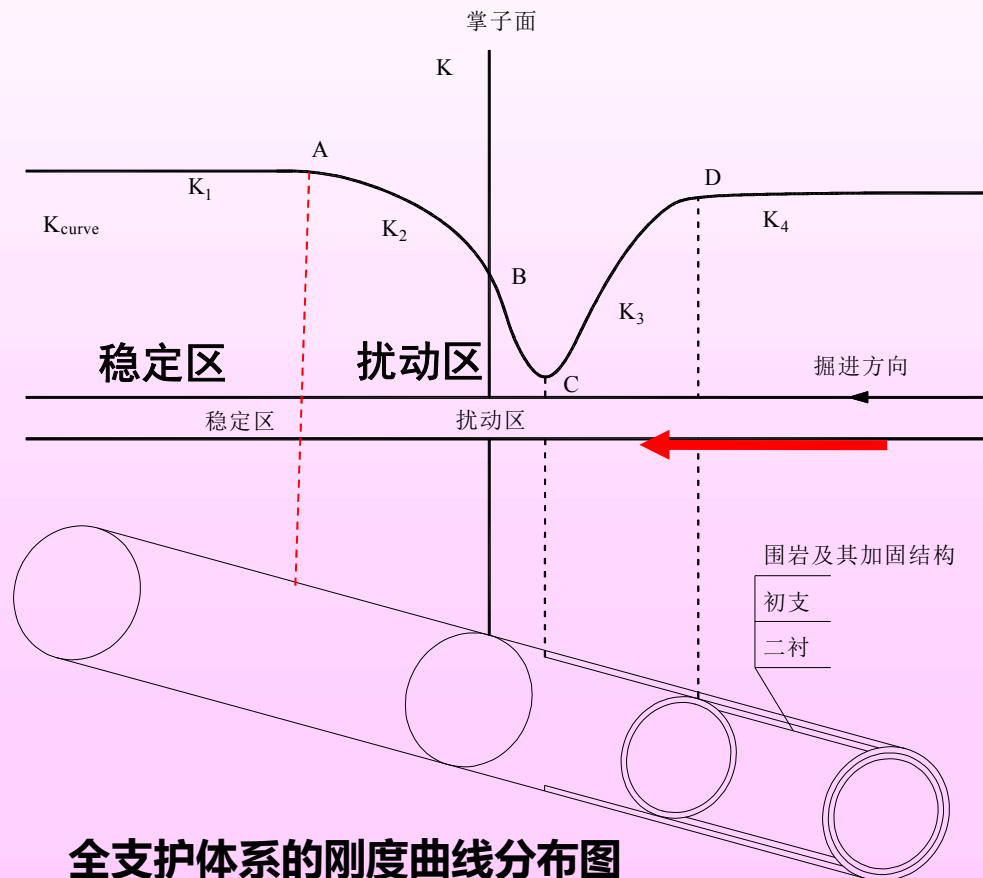


5 隧道支护结构的协同作用原理

隧道支护结构体系协同作用模型

Collaborative effect model of tunnel support system

隧道支护结构体系协同优化方法与设计参数



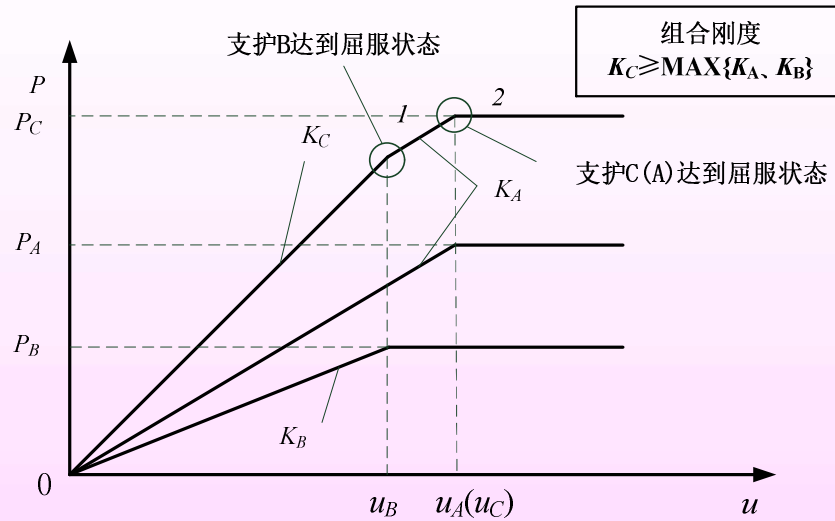
全支护体系的刚度曲线分布图

A点以前的区域为稳定区；
AB、BC、CD为扰动区，刚度逐渐变化 $K_2 \sim K_3$ ；
D点之后的支护刚度用 K_4 来表示，该段岩土体仍然属于扰动区的一部分，但显然这时的岩土体已经进入了一种新的平衡状态。

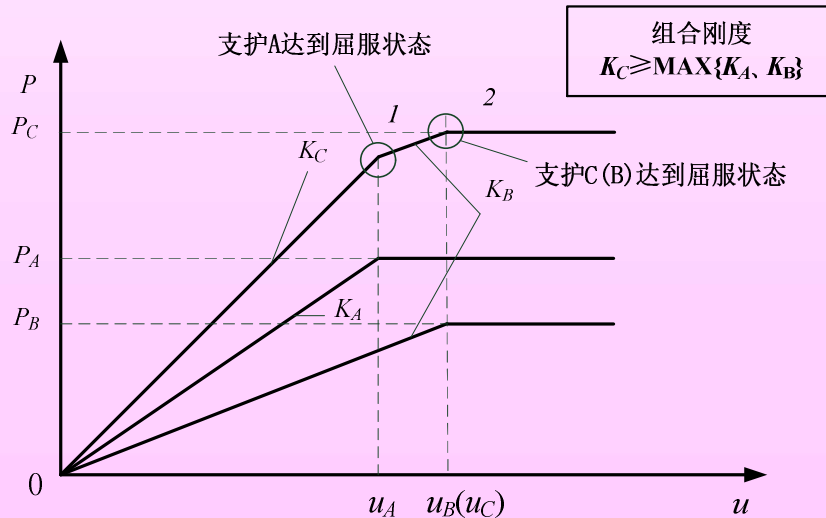


5 隧道支护结构的协同作用原理

隧道支护体系的支护特征曲线



“高刚度-大形变” 支护
与 “低刚度-小形变” 支
护同时施作。



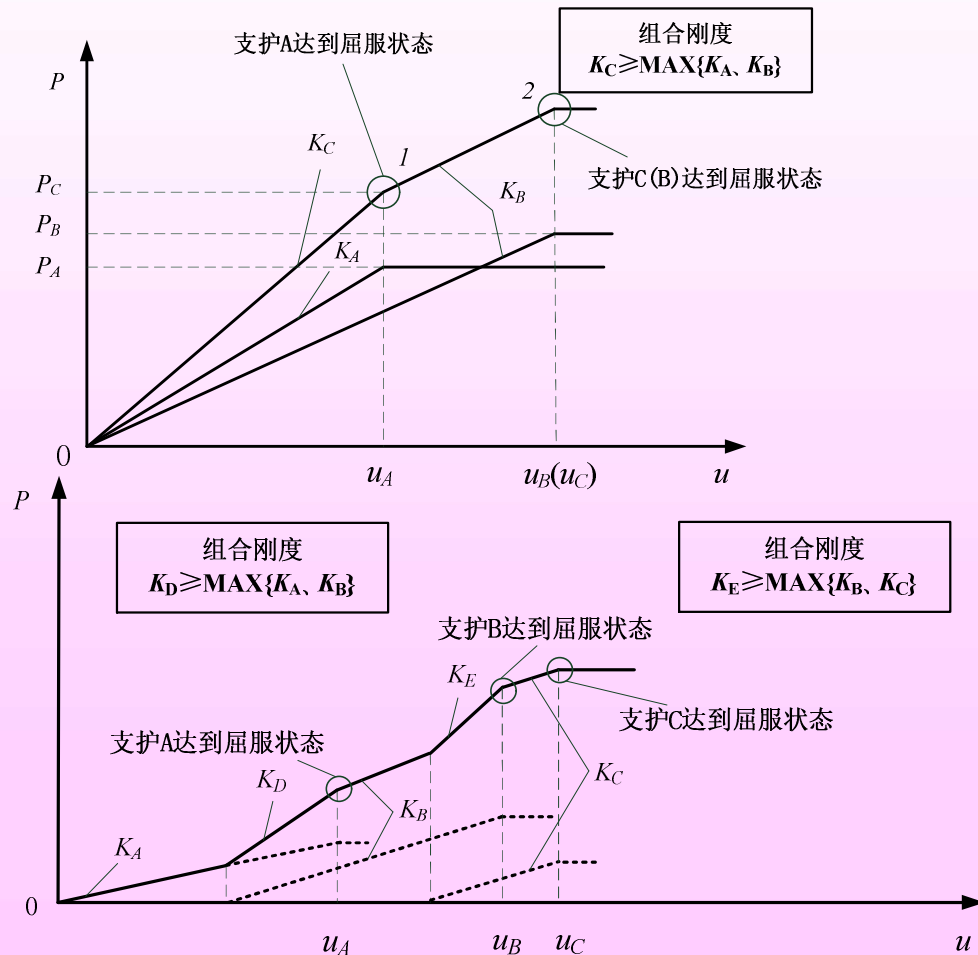
“高刚度-小形变” 支护与
“低刚度-大形变” 支护同
时施作。



5 隧道支护结构的协同作用原理

隧道支护体系的支护特征曲线

复杂支护体系可以抽象为不同“刚度”与“变形量”的支护结构组合



“高刚度-低承载”
与“低刚度-高承载”
配合。

多种支护形式的分
时段叠加

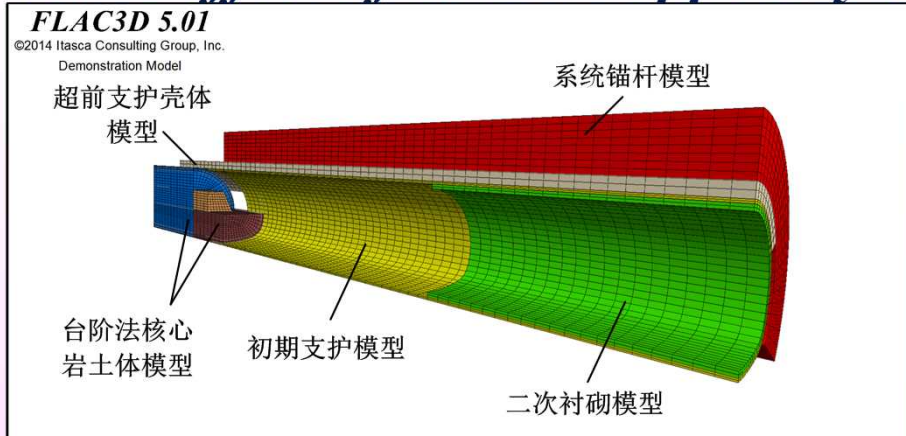
— 协同作用。



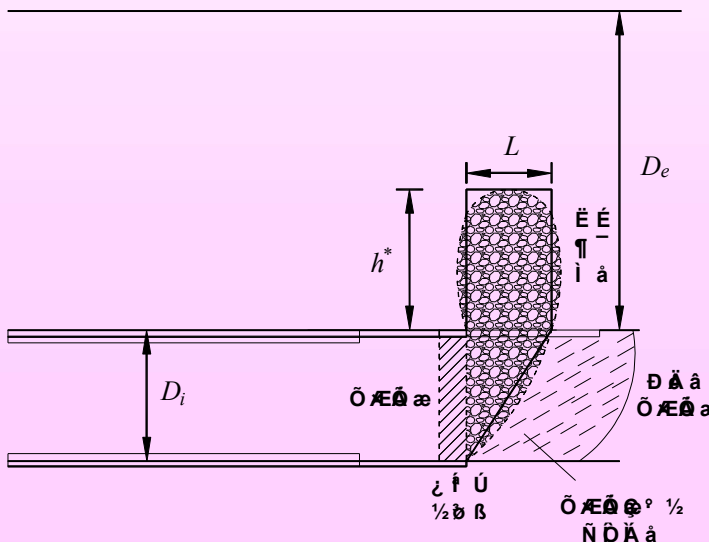
5 隧道支护结构的协同作用原理

隧道支护体系的协同作用原理

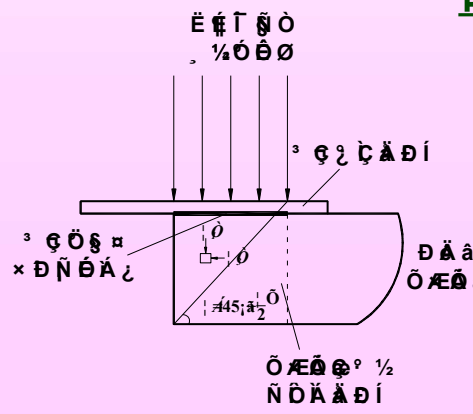
Collaborative effect of tunnel support system



超前支护结构体系的协同关系主要体现为超前岩土体与各类超前支护的相互增益。



掌子面前方围岩荷载效应



超前协同模型

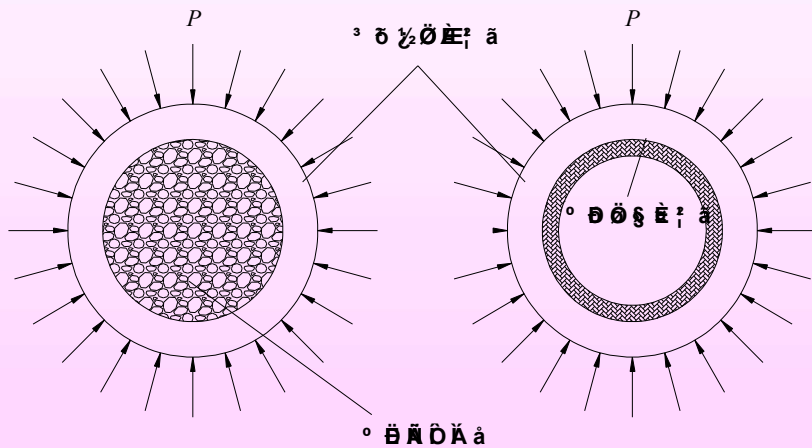


5 隧道支护结构的协同作用原理

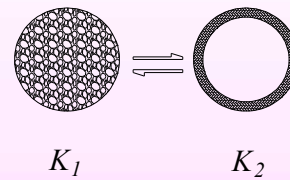
隧道支护体系的协同作用原理

Collaborative effect of tunnel support system

超前支护与后续支护结构的协同，从环向上解释了具有施作时间差的各支护圈层间应当满足的刚度匹配条件：



岩土体与后续支护结构的
替换关系



$K_1 > K_2$, 需要提高围岩的强度参数
 或留出一定的变形量
 $K_1 \leq K_2$, 后续支护可以完全承担所有
 围岩荷载

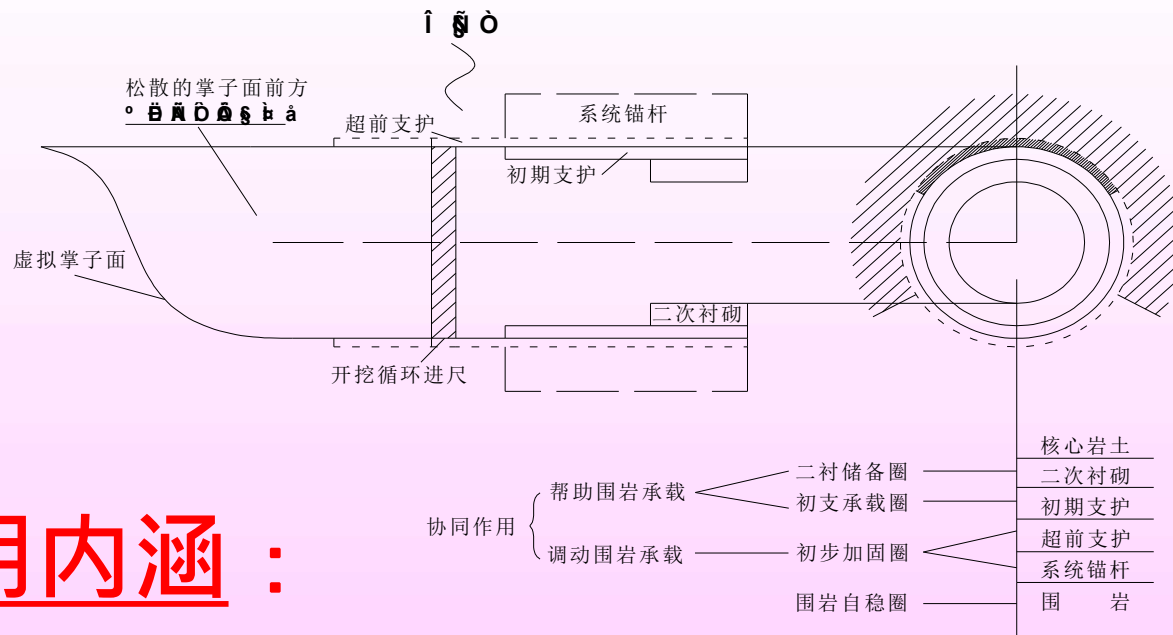
现阶段一般材料无法满足要求，且不可能出现瞬时支护。因此 $K_1 > K_2$ 是一种常态，在这样的前提下原有的平衡状态必然要被打破，也就是说围岩有必要提高自身的承载能力或发生一定的变形来降低对支护刚度的需求，在此前提下才有可能再次达到平衡状态。



5 隧道支护结构的协同作用原理

隧道支护体系的协同作用原理

Collaborative effect of tunnel support system



协同作用内涵：

1. 协同的主体是隧道围岩与支护体系；
2. 协同的手段是调节各支护结构的刚度与支护时机；
3. 协同的目标是围岩变形量与支护荷载的合理分配。



5 隧道支护结构的协同作用原理

隧道支护结构体系的协同作用原理：

Synergistic effect of tunnel support structure system

隧道支护结构体系共同承担地层的附加荷载，而各种支护结构之间的协同作用可以使支护作用的效率最高。

而对“协同效果”的评价应注重则以安全性为目标，主要包括两类指标，即围岩变形指标和支护结构受力指标。

显然，协同作用的本质就是建立多目标、分阶段的优化设计分析模型，满足总体目标和阶段目标最优的要求。

$$\begin{cases} S = f(k_{\text{超前支护}}, k_{\text{锚固体系}}, k_{\text{初期支护}}, k_{\text{二次衬砌}}) \\ \xi = f(p_{\text{超前支护}}, p_{\text{锚固体系}}, p_{\text{初期支护}}, p_{\text{二次衬砌}}) \end{cases}$$



5 隧道支护结构的协同作用原理

支护体系协同作用模型的建立

隧道支护结构体系的协同作用模型：

显然，由于支护结构分阶段施作，函数 S 与 P 为分段函数，对于函数，其求解思路如下：

(1) 首先，根据现有研究成果总结归纳出围岩位移与纵向距离的关系，选取合适的位移释放系数表达式如下：

$$\lambda_x = \frac{u_x}{u_{\max}} = \left[1 + \exp\left(\frac{-x}{1.1r_0}\right) \right]^{-1.7}$$

(2) 当支护时机确定后，由步骤(1)可得到支护结构施作时围岩已发生的位移量，假定支护为线弹性构件，则对于某一分析断面，其支护反力与支护刚度之间的关系为

$$p_1 = k_i \left(u_x - u_{x_i} \right)$$



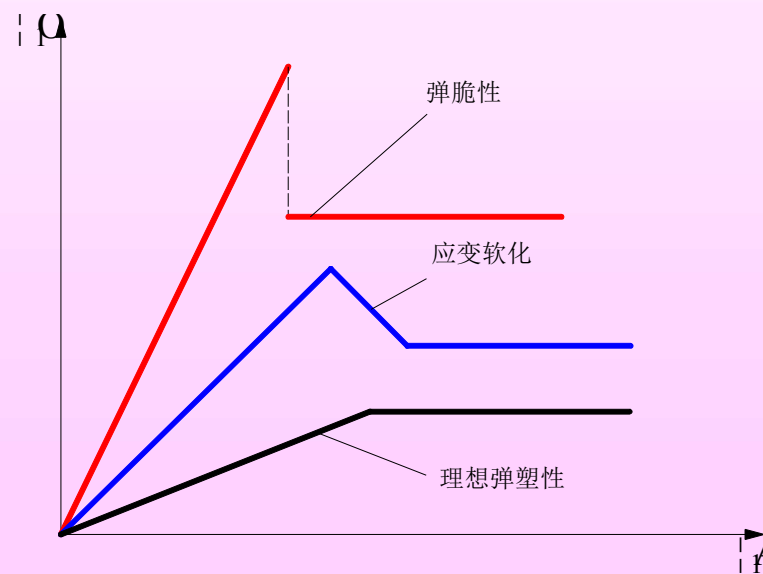
5 隧道支护结构的协同作用原理

支护体系协同作用模型的建立

(3) 根据岩土体的峰后行为选取合适的本构模型和屈服准则，从而得到围岩位移与支护力关系的弹塑性解答，形式如下

$$u=f(p_i)$$

按照上述3个步骤即可建立单一支护结构与围岩相互作用的协同作用模型，对于隧道支护结构体系，只需重复上述步骤，并改变相关参数和初始条件即可。





5 隧道支护结构的协同作用原理

以弹性围岩为例，由上述3个步骤可得第一组支护施作后围岩位移关于纵向距离的表达式为

$$S_1 = \frac{u_{\max}}{1+k_1mr_0} \left(k_1mr_0\lambda_{x_1} + \lambda_x \right)$$

则第二组支护施作时围岩已发生的位移为

$$S_{x_2} = \frac{u_{\max}}{1+k_1mr_0} \left(k_1mr_0\lambda_{x_1} + \lambda_{x_2} \right)$$

因此可得第二组支护施作后围岩位移关于纵向距离的表达式为

$$S_2 = \frac{u_{\max}\lambda_x + (k_1+k_2)mr_0S_{x_2}}{1+(k_1+k_2)mr_0}$$



5 隧道支护结构的协同作用原理

总结以上二式规律，并结合计算原理可得当支护结构在围岩弹性阶段施作时，围岩位移关于纵向距离表达式的统一形式为

$$S_n = \frac{u_{\max} \lambda_x + \sum_{i=1}^n k_i m r_0 S_{x_i}}{1 + \sum_{i=1}^n k_i m r_0}$$

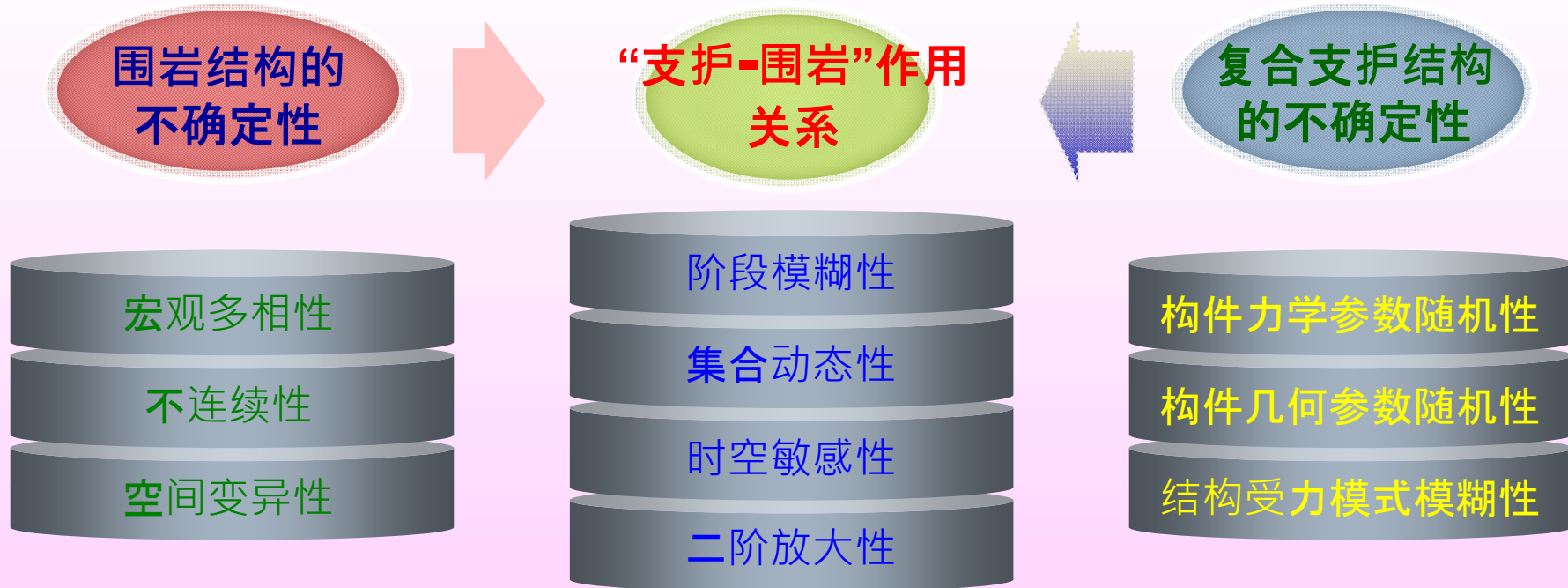
其中 S_{x_i} 为第 i 组护施作时围岩发生的位移，其递推公式为

$$S_{x_i} = \frac{u_{\max} \lambda_{x_i} + \sum_{i=1}^n k_{i-1} m r_0 S_{x_{i-1}}}{1 + \sum_{i=1}^n k_{i-1} m r_0}$$



“支护-围岩”系统的不确定性

Uncertainty of surrounding rock and support system



不确定性的本质来自围岩与支护结构，且在相互作用过程中具有耦合特性，受外界附加因素的作用，表现出“二阶不确定性”。“支护-围岩”系统不确定性是隧道设计的难题之一！



“支护-围岩”系统的不确定性统计分析

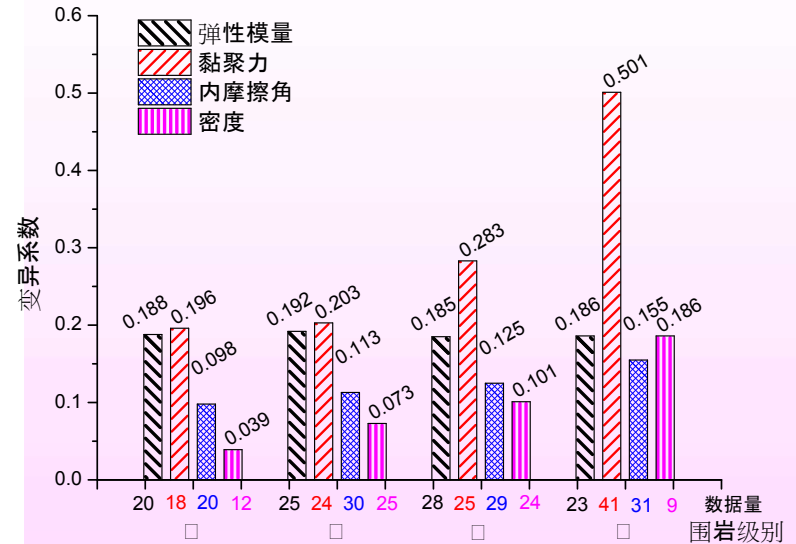
Statistical analysis of surrounding rock and support system uncertainty

表 1 围岩力学参数变异系数及分布类型统计结果

项目	变异系数统计特征				参数分布类型					
	平均值	变异系数	样本总数	建议区间	正态	对数正态	极值 I 型	均匀	样本总数	建议分布
弹性模量 E(MPa)	0.1830	0.6775	112	[0-0.40]	61	11	—	—	72	正态
泊松比 μ	0.1795	0.8996	39	[0-0.32]	30	1	—	4	35	正态
粘聚力参数 c(MPa)	0.2656	0.7180	115	[0-0.52]	68	18	—	—	86	正态
内摩擦角 $\varphi(^{\circ})$	0.1230	0.7098	122	[0-0.23]	68	18	—	—	86	正态
密度 $\rho(\text{Kg/m}^3)$	0.0868	1.5673	80	[0-0.24]	58	3	3	1	65	正态
弹性反力系数 K(MPa/m)	0.2065	0.4722	63	[0-0.36]	21	19	—	1	41	正态或对数正态

表 2 支护几何及力学参数变异系数及分布类型统计结果

项目	变异系数统计特征				参数分布类型					
	平均值	变异系数	样本总数	建议区间	正态	对数正态	极值 I 型	均匀	样本总数	建议分布
衬砌厚度 t(m)	0.1961	2.0281	99	[0-0.32]	52	14	—	—	66	正态
初支弹性模量 E(MPa)	0.1116	0.4743	48	[0-0.22]	39	—	—	—	39	正态
二衬弹性模量 E(MPa)	0.0976	0.4840	46	[0-0.20]	39	6	—	—	45	正态
初支泊松比 μ	0.1203	0.6132	7	[0-0.24]	5	—	—	2	7	正态
二衬泊松比 μ	0.1125	0.9054	5	[0-0.29]	3	—	—	—	3	正态
初支密度 $\rho(\text{Kg/m}^3)$	0.0708	1.0754	19	[0-0.20]	17	—	—	—	17	正态
二衬密度 $\rho(\text{Kg/m}^3)$	0.0707	1.0669	26	[0-0.20]	22	—	—	—	22	正态
砼抗压极限强度 Ra(MPa)	0.1457	0.2530	67	[0-0.21]	40	7	—	—	47	正态
砼抗拉极限强度 Rl(MPa)	0.1599	0.2643	52	[0-0.21]	35	5	—	—	40	正态
钢筋强度(MPa)	0.0630	0.3446	17	[0-0.10]	12	1	—	—	13	正态



不同级别下围岩力学参数变异系数频率直方图

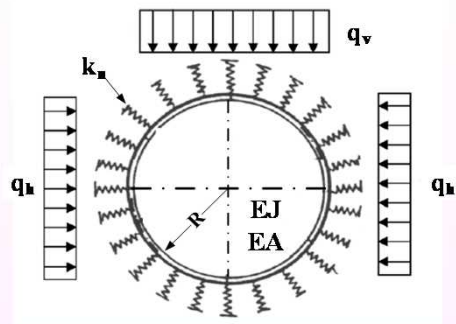
(分级标准参见《铁路隧道设计规范》)

统计结论要点：

- 围岩结构的不确定性要远大于支护结构的不确定性；
- 稳定性条件差的围岩的不确定性大于稳定性条件好的围岩。

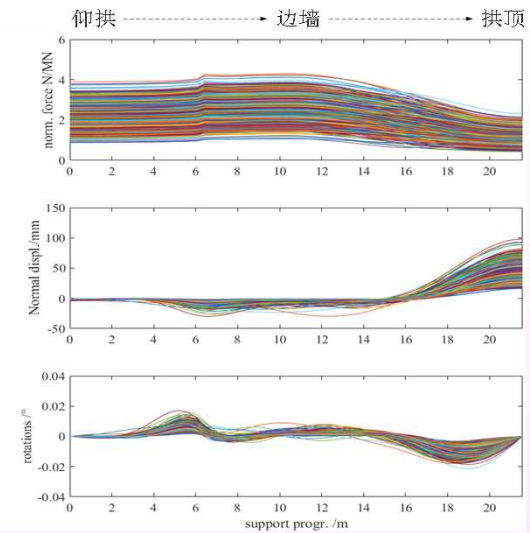
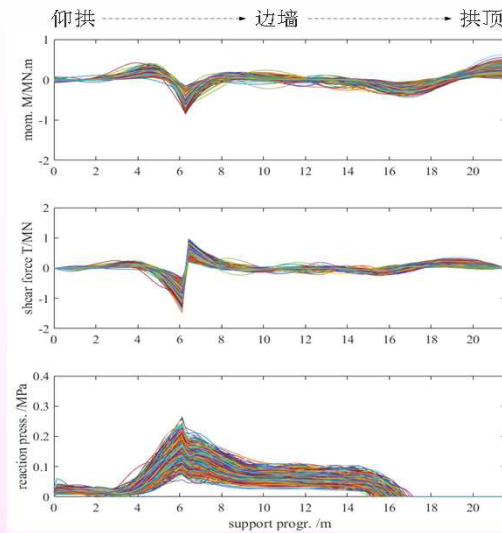


6 隧道围岩空间变异性的力学响应分析

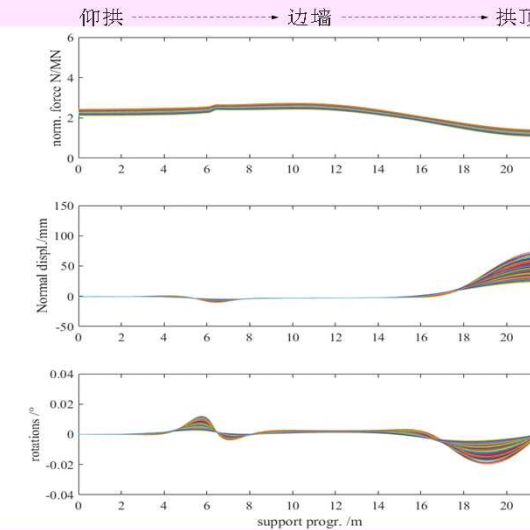
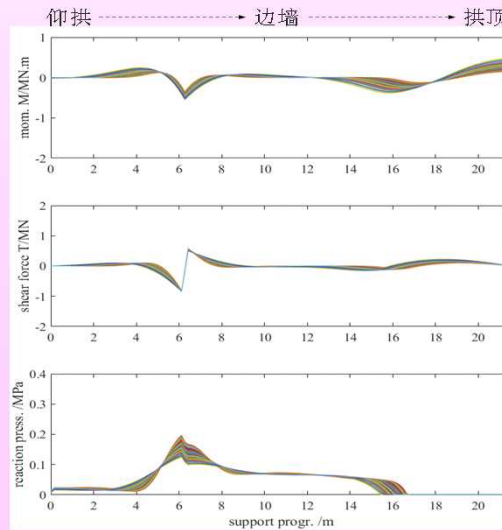


超静定反力法示意图
(Hyperstatic Reaction Method)

围岩作为天然材料，其不确定性的表现形式、量值范围，影响程度要远大于支护结构。因此，对“支护-围岩”系统的分析应着重考虑围岩结构的不确定性。



A、仅考虑围岩参数随机性的支护结构力学响应



B、仅考虑支护参数随机性的支护结构力学响应



围岩结构不确定性的表征方法

Characterization method of surrounding rock structure uncertainty

围岩结构的不确定性

宏观多相性

- ◆ 隧道断面尺度
- ◆ 气态（溶洞、空洞）
- ◆ 液态（地层水）
- ◆ 固态（多种岩土体）
- ◆ 两相或三相随机分布

非连续性

- ◆ 结构构造特征
- ◆ 节理构造（产状、长度、间距、起伏角等）
- ◆ 岩土体互层
- ◆ 统计角度是随机的

空间变异性

- ◆ 同一类围岩
- ◆ 随机特征：参数变异性
- ◆ 渐变特征：空间相关

针对性建模

- ◆ 又称分类特性建模
- ◆ 宏观多相性及非连续性起主导作用的围岩结构
- ◆ 地质元素单独分析，考虑其形态特征、数量及空间分布的随机性

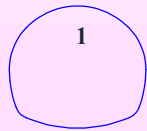
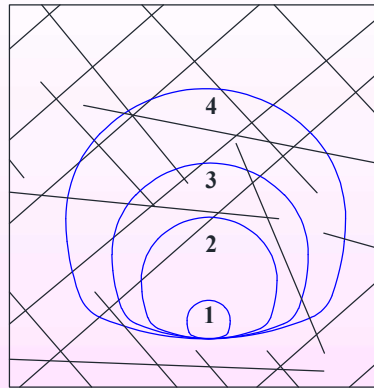
整体性建模

- ◆ 又称降尺度建模
- ◆ 空间变异性起主导作用的围岩结构
- ◆ 通常采用随机场或地质统计学Kriging理论

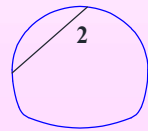


围岩结构不确定性的特点及表征方法

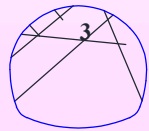
Representation method of surrounding rock structure uncertainty



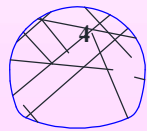
(1) 整体性建模



(2) 混合性建模



(3) 针对性建模



(4) 针对性建模

整体性建模

混合性建模

针对性建模

混合性建模

- ◆ 无法确定主导因素
- ◆ 整体性建模+针对性建模
- ◆ 计算量大，计算结果离散性明显

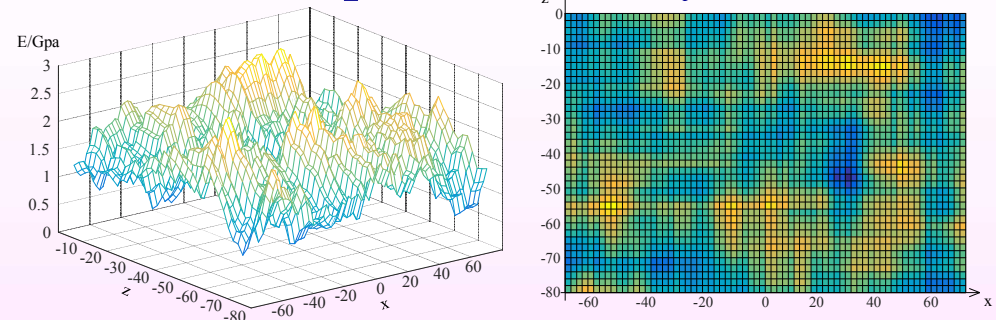
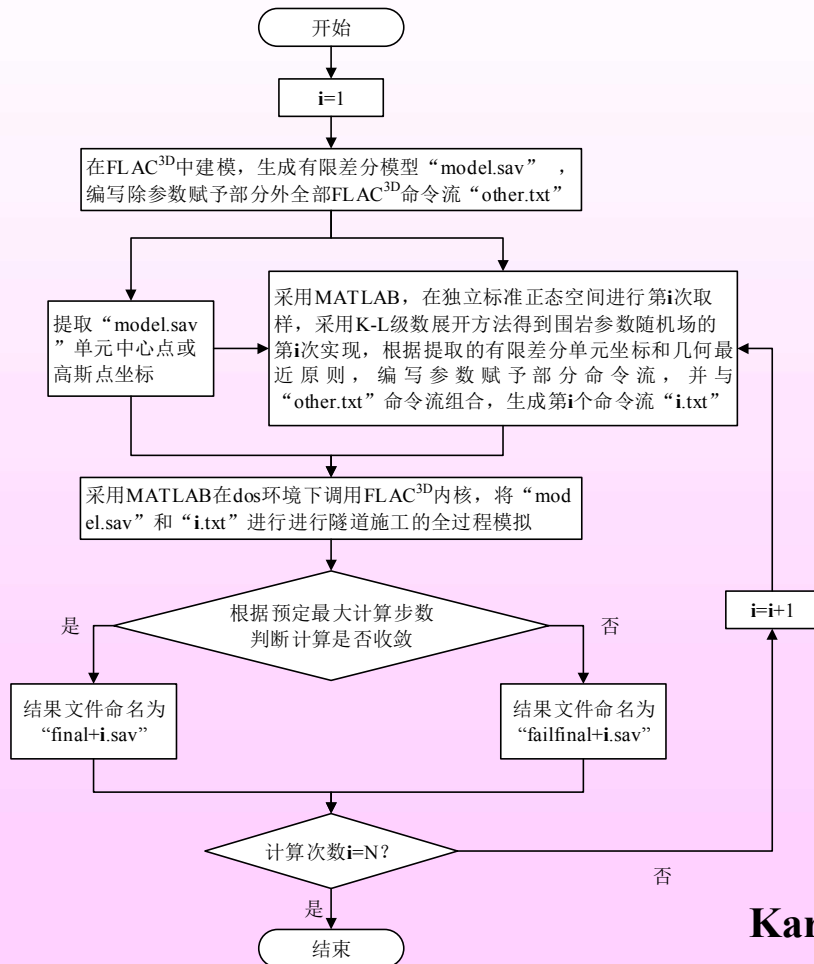
实际上，对于宏观多相性及非连续性起主导作用的围岩结构，其不确定性最佳的处理方式是加强地质勘查和超前地质预报。通过提高系统的基础资料，将不确定性转化为确定性进行研究。

由于空间变异性的普遍存在性、渐变性和平稳性特性，适于系统性研究且能得出相对普遍性规律。

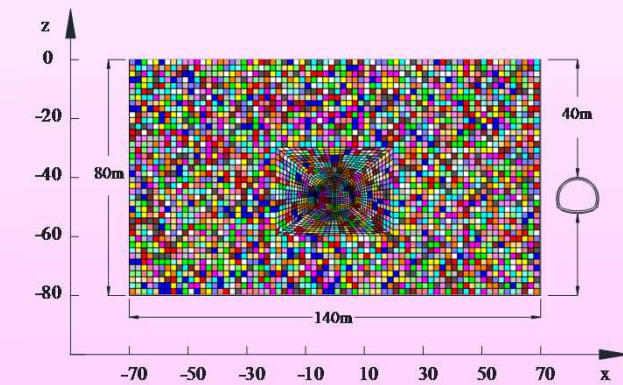


围岩结构空间变异性的建模流程

Modeling procedure of surrounding rock structure spatial variability



参数随机场在MATLAB中的表达



参数随机场在FLAC^{3D}中的表达

Karhunen-Loève级数展开公式:

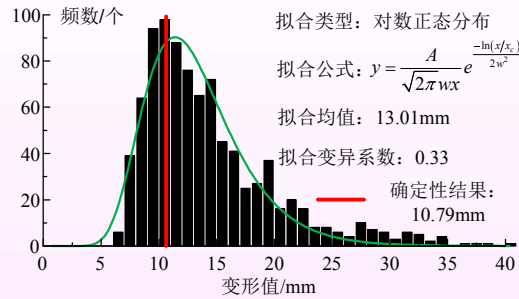
$$\hat{H}_{X_i}(x, y; \theta) = \mu_{X_i} + \sum_{j=1}^n \sigma_{X_i} \sqrt{\lambda_j} f_j(x, y) \xi_{X_i, j}(\theta), (x, y) \in \Omega$$

非侵入式随机有限差分分析模型流程图

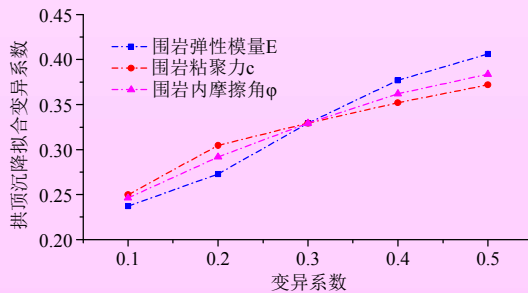
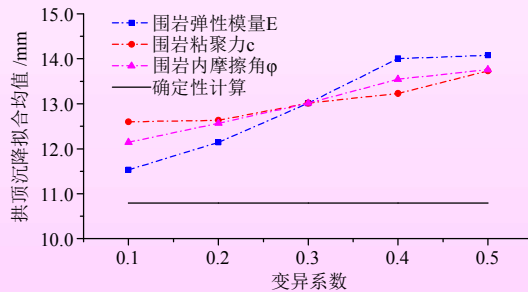


围岩参数变异性的力学响应分析

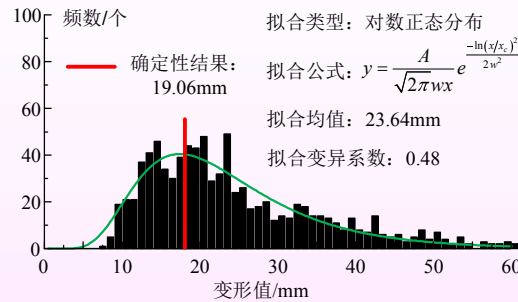
Mechanical response analysis of surrounding rock considering parameter variability



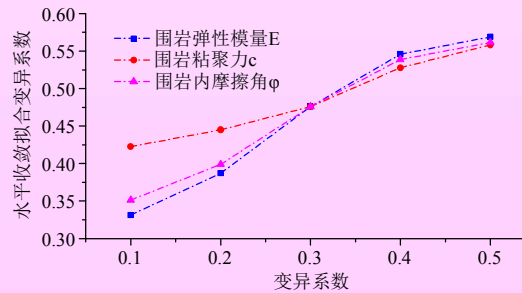
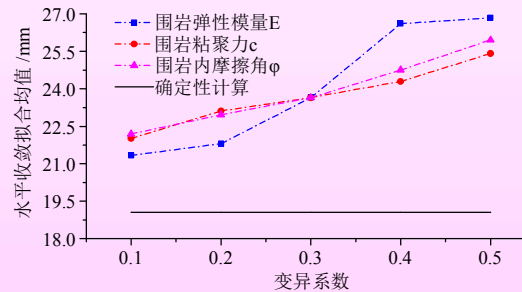
拱顶沉降频数分布直方图及拟合结果 (工况: RF-E3)



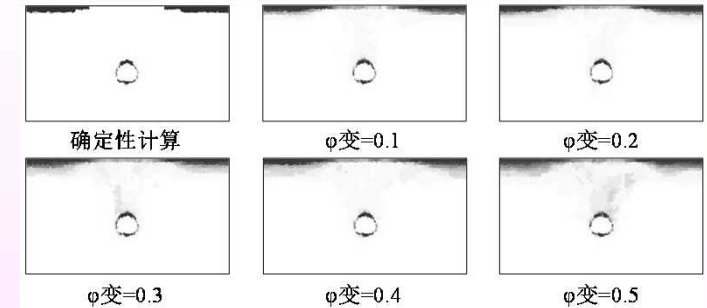
不同工况下拱顶沉降统计参数比较



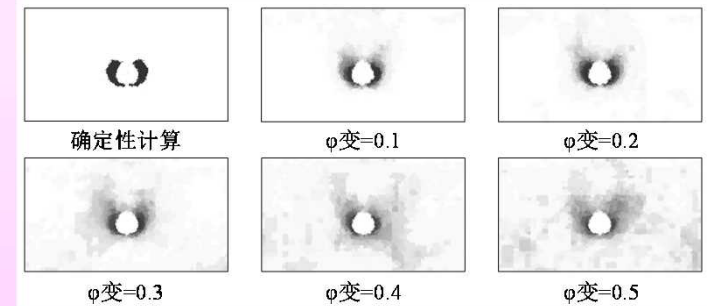
水平收敛频数分布直方图及拟合结果 (工况: RF-E3)



不同工况下水平收敛统计参数比较



拉塑性区分布比较 (工况: RF-φ)



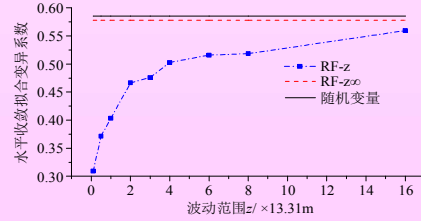
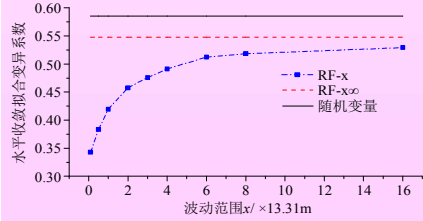
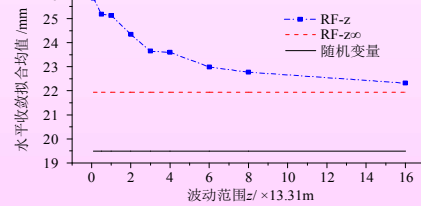
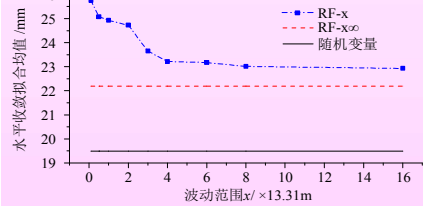
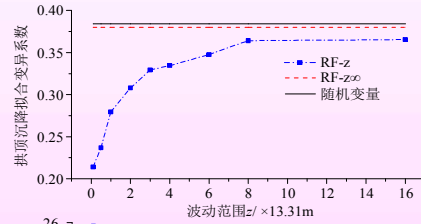
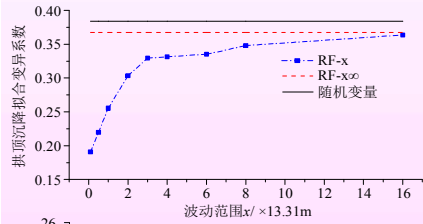
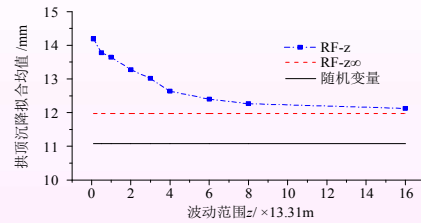
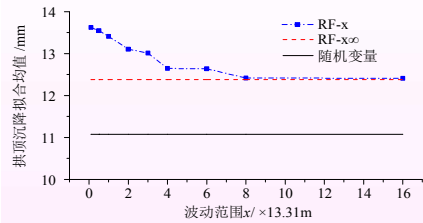
剪塑性区分布比较 (工况: RF-φ)

随围岩变异性增大, 围岩变形统计均值和离散性逐渐增大, 塑性区范围也逐渐增大, 其屈服形态和发展趋势均朝不稳定方向发展, 围岩的自稳时间越来越短。



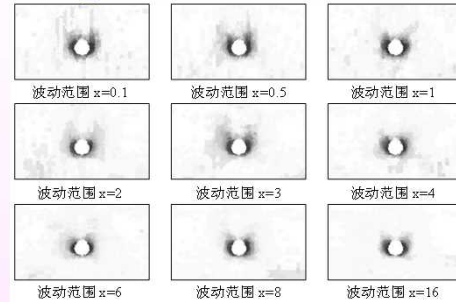
围岩空间相关性的力学响应分析

Mechanical response analysis of surrounding rock considering spatial correlation

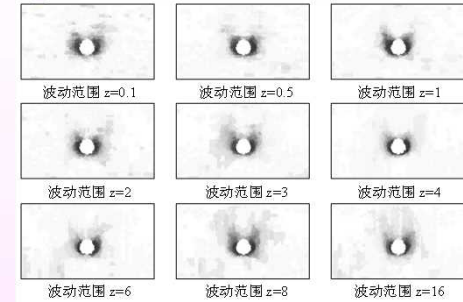


拱顶沉降和水平收敛拟合结果汇总 (RF-x)

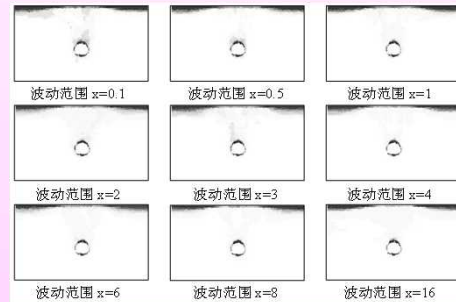
拱顶沉降和水平收敛拟合结果汇总 (RF-z)



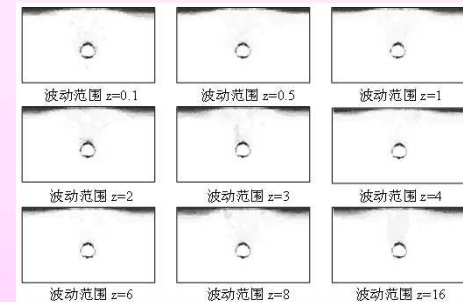
剪塑性区分布比较 (RF-x)



剪塑性区分布比较 (RF-z)



拉塑性区分布比较 (RF-x)



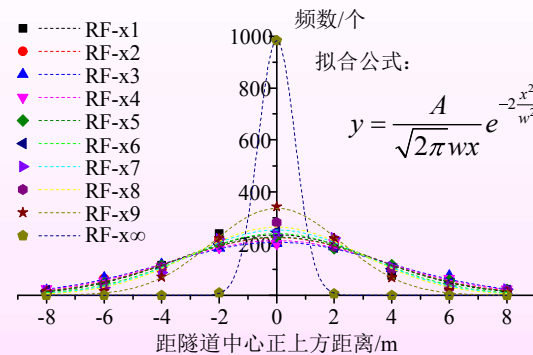
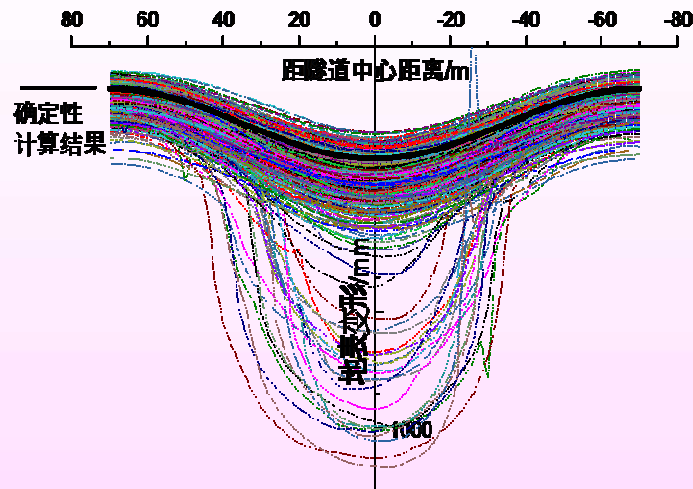
拉塑性区分布比较 (RF-z)

随着围岩空间相关性的增加，围岩变形的统计均值逐渐减小，离散程度逐渐增加，塑性区的影响范围、屈服形态、对称特性和发展趋势也会发生不同程度的变化。

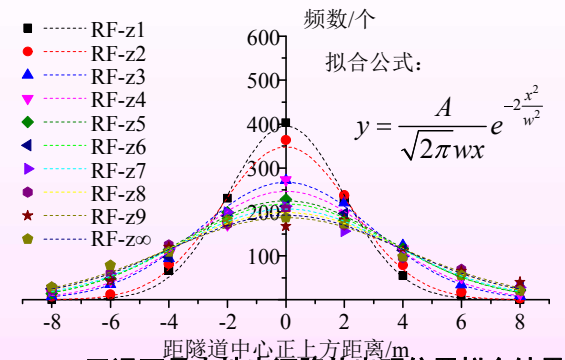


围岩参数空间变异性的力学响应分析

Mechanical response analysis of surrounding rock considering spatial variability

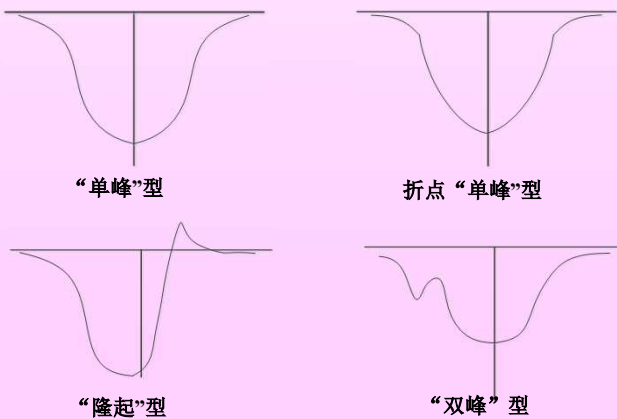


RF-x工况下最大地表沉降值出现位置拟合结果



RF-z工况下最大地表沉降值出现位置拟合结果

地表沉降统计结果（工况：RF-E3）



地表沉降模式示意图

在围岩变异性方面，随变异性增加，地表沉降最大值均值和离散度逐渐增大，地表沉降形态的混沌特性和离散特征也越明显；在空间相关性方面，波动范围对地表沉降特征，尤其是地表沉降最大值的出现位置的影响不容忽视。对于地层环境控制要求高的工程，在进行安全分析与变形预测时，波动范围是需要考虑的众多参数之一。



围岩结构空间变异性的工程影响

Engineering influence of surrounding rock spatial variability

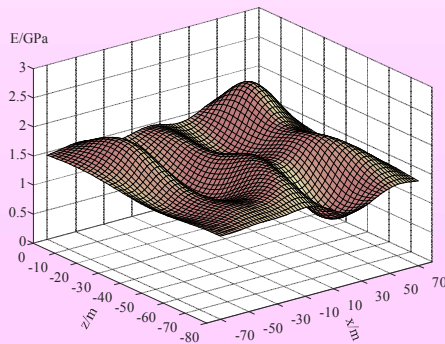
随机场模型与确定性模型计算结果比较

围岩空间变异性的工程效应：

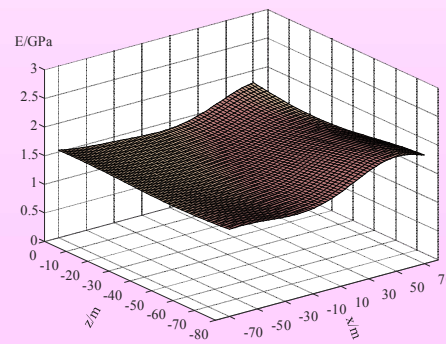
- ① 围岩结构性低强度荷载占优效应
- ② 围岩结构空间相关各向异性效应
- ③ 功能函数敏感性差异及非线性效应
- ④ 功能函数转变分布类型效应

工况及序号	E/GPa	c/kPa	$\phi/^\circ$	计算收敛	拱顶沉降/mm	水平收敛/mm
确定性	1.50	125	23.5	是	10.79	19.06
141	1.45	133	20.0	是	14.79	29.55
142	1.31	140	21.8	是	17.23	30.42
143	1.46	123	21.7	否	28.42	971.23
144	1.54	154	25.3	是	12.23	16.70
RF-E3 145	1.72	128	21.0	否	159.5	487.60
146	1.42	146	22.4	是	14.47	23.99
147	1.51	109	21.3	是	35.53	42.64
148	1.51	119	21.2	是	14.35	28.21
149	1.30	135	23.1	是	13.71	24.46
150	1.58	141	26.2	是	14.42	17.19

受开挖作用影响区域内围岩的力学特性，除了受到该区域围岩参数的算术平均值的影响，低强度参数对围岩的力学特性的影响作用不可忽视，主要表现为荷载特性，称之为围岩结构性低强度荷载占优效应。



波动范围13.31m×13.31m



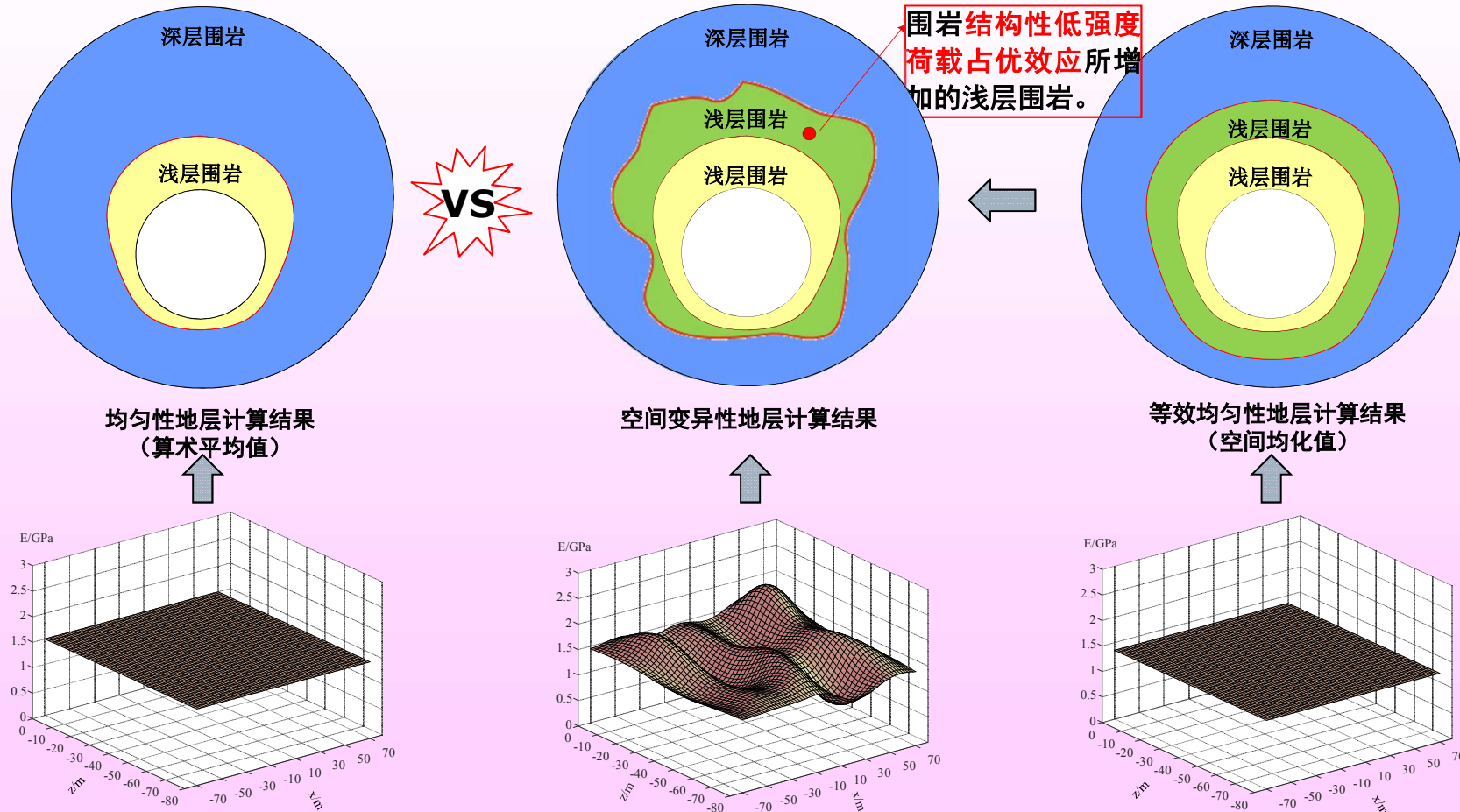
波动范围133.1m×133.1m

不同波动范围参数随机场模拟结果比较



空间变异性对围岩结构性的影响

Influence of surrounding rock spatial correlation on structural property



在围岩结构性低强度荷载占优效应的影响下，在推求等效围岩参数时，其取值不应采用围岩参数的**算术平均值**，而是应该考虑其空间变异特性的**“空间均化值”**。



空间变异性对支护协同作用的影响

Influence of surrounding rock spatial correlation on collaborative effects of support

隧道支护的两大基本作用：

调动围岩承载



协助围岩承载

- 隧道围岩加固
- 初喷混凝土
- 锚杆支护作用

- 隧道超前支护结构
- 隧道初期支护结构
- 隧道二次衬砌结构

围岩空间变异性

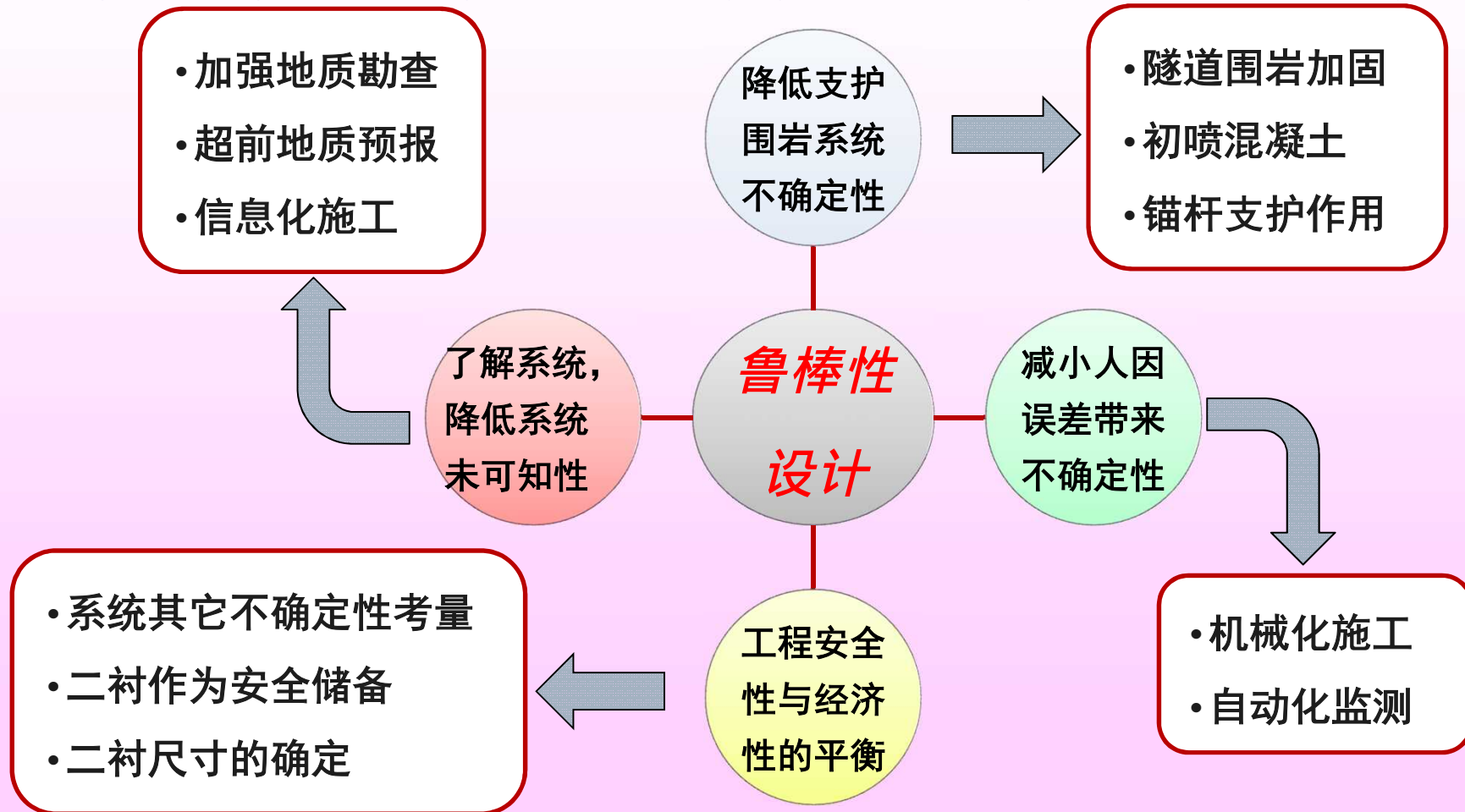
- 1、**弱化围岩承载结构**、增加了**支护调动围岩承载的难度**；
- 2、**提高狭义支护荷载**、增加了**支护协助围岩承载的负担**；
- 3、**降低支护构件之间的增益性**，降低了**复合支护的协同性能**。

由于围岩结构空间变异性的客观存在，给隧道支护设计提出一个的额外要求：在调动围岩承载和协助围岩承载的同时，能够降低围岩结构不确定性所带来的工程影响。



“支护-围岩”系统不确定性的工程应对措施

Engineering measures for uncertainty of surrounding rock and support system



目标：提升“支护-围岩”动态作用系统的鲁棒性



1. 分析浅层围岩范围及深层围岩结构稳定性，进而预测隧道围岩荷载释放过程及演化特点：据此制定隧道支护设计的总体方案。
2. 根据围岩超前变形与破坏特点，制定围岩超前加固和隧道超前支护方案：辅助施工方法和隧道开挖方案的设计。
3. 按照深浅层围岩结构及其稳定性的分析，分别制定出**调动围岩承载和协助围岩承载**的支护设计方案：建立初期支护荷载计算模型，确定初期支护结构形式和工艺参数。
4. 基于隧道工程特点以及围岩变异性确定隧道二次衬砌结构安全储备方案和系数：明确初期支护结构承担全部围岩荷载，二次衬砌仅作为安全储备。
5. 分析了围岩空间变异性对其变形破坏的影响，得出围岩具有**结构性低强度荷载占优**的附加效应，在该效应的影响下，围岩等效设计参数应采用其“**空间均化值**”。



理论创新与突破：

- 提出了隧道围岩复合结构新理念，创建了隧道围岩结构模型，并给出了支护结构荷载的计算方法。
- 提出了围岩荷载的三个层次，明确了初期支护的主承载作用地位和二次衬砌结构的安全储备作用。
- 提出了“支护-围岩”作用的四个阶段，建立了隧道支护结构体系的多目标、分阶段协同作用模型，并由此开发了隧道支护结构设计方法。



隧道围岩结构形式与支护结构荷载确定方法是隧道工程的核心问题，也是隧道结构设计必须回答的关键问题，对此进行了分析，给出相应的建议和计算方法，但考虑到隧道围岩条件的极其复杂性以及围岩力学响应的变异性，隧道支护结构荷载的精确计算十分困难，因此设计中工程经验仍然十分重要！应当指出，隧道围岩地质条件的工程响应和安全效应，比围岩条件本身应引起更多的关注，这样才能使隧道设计更具科学性！



Thank you!