

## 第二章

# 地壳岩体的天然应力状态

成都理工大学

精品课程



# 本章学习内容及要求

精品课程

- ☞ 掌握岩体应力等基本概念；
- ☞ 理解地表岩体应力状态的复杂性，了解大地应力场的特征及分布规律；
- ☞ 掌握利用大地应力场特征判定一个地区可能产生的最新活动断裂的运动方向和错动方式；
- ☞ 掌握河谷高边坡应力分布模式，地壳表层高地应力区及其地质地貌标志；
- ☞ 了解岩体天然应力状态的研究和评价方法。

# 本章重点及难点

精品课程

## ■ 重点：

- 地表岩体应力状态的复杂性；

## ■ 难点：

- （1）地表岩体应力状态的复杂性，不仅表现在其大小、方向不同，还表现在随时间的变化上，同时受多种因素的控制和影响。
- （2）河谷高边坡应力分布模式。

## 2.1 基本概念及研究意义

---

### 2.1.1 岩体地应力的基本概念

地壳岩体内的天然应力状态，是指未经人为扰动的，主要是在重力场和构造应力场的综合作用下，有时也在岩体的物理、化学变化及岩浆侵入等的作用下所形成的应力状态，常称为**天然应力**或**初始应力**或**原岩应力**。

人类从事工程活动，在岩体天然应力场内，因挖除部分岩体或增加结构物而引起的应力，称为**感生应力**。

## 2.1 基本概念及研究意义

按成因，对构成岩体应力的各组分作如下分类：

天然应力或初始应力 (virginal stress)

自重应力 (*gravitational stress*)

构造应力 (*tectonic stress*)

活动的 (active tectonic stress)

剩余的 (residual tectonic stress)

变异及残余应力 (*altered and residual stress*)

感生应力 (induced stress)

## 2.1 基本概念及研究意义

### 2.1.2 研究岩体天然应力状态的意义

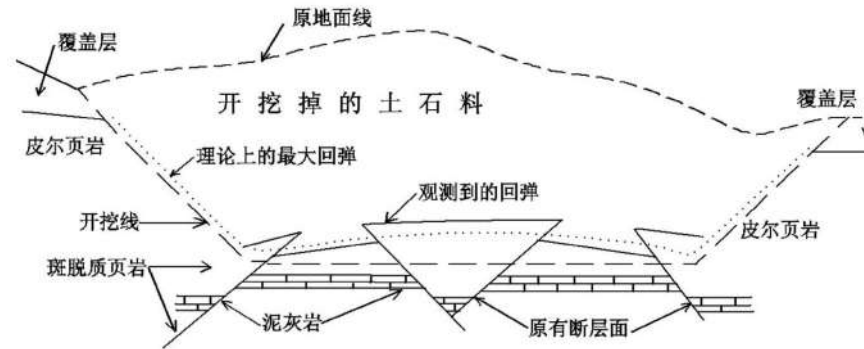
(1) 岩体天然应力状态或地应力场是工程岩体存在的**基本环境条件**之一。它对工程岩体（或是地质体）的变形和破坏起重要控制作用。因此，它是区域稳定性和岩体稳定性评价和岩体工程设计的重要因素或参量。

(2) 岩体地应力场是决定各类**地下建筑物稳定性**的主要因素，特别是在高地应力区。

(3) 修建大坝、大型水库和深大地下洞室等，在更大范围内破坏**天然地应力的原有平衡状态**，引起一系列诸如断层复活、水库地震以及大规模岩爆等严重危害人民财产及施工人员安全的工程地质作用。

## 2.1 基本概念及研究意义

- ✓ 基坑底部的隆起、爆裂和沿已有结构面的逆冲错动。

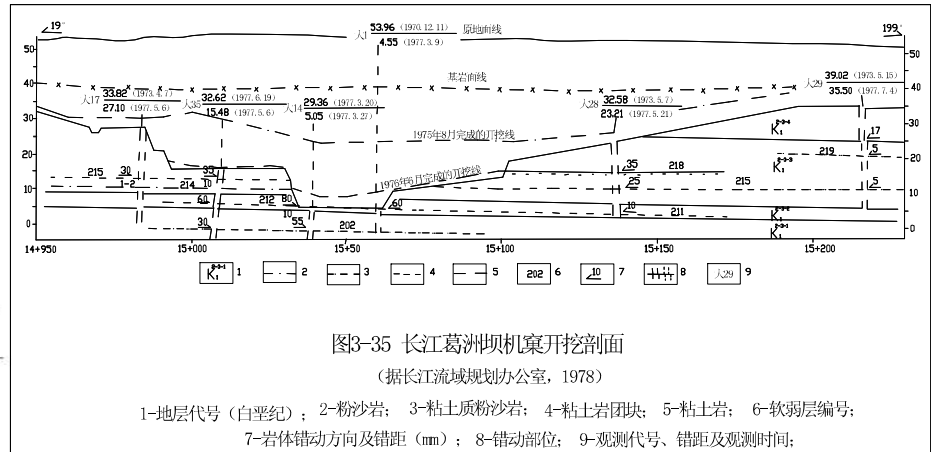
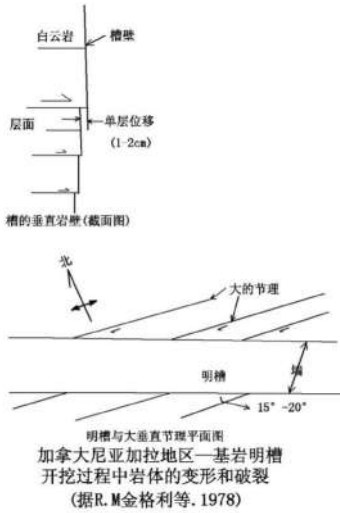


俄亥坝静水池基坑开挖过程中岩体的变形、坡坏情况示意图

## 2.1 基本概念及研究意义

精品课程

- ✓ 边墙向临空方向的水平位移和沿已有的近水平的结构面发生剪切错动。

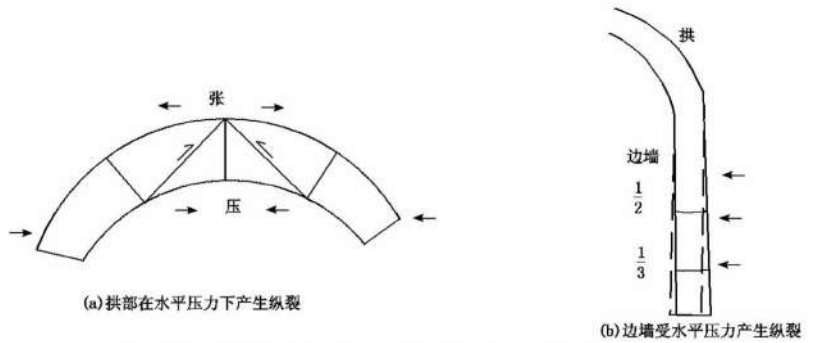




## 2.1 基本概念及研究意义

- 在\*\*高地应力地区\*\*，地下开挖产生的岩体变形和破坏也有不同的类型：

- 拱顶裂缝掉块
- 边墙内鼓张裂
- 底鼓及中心线偏移
- 施工导坑缩径

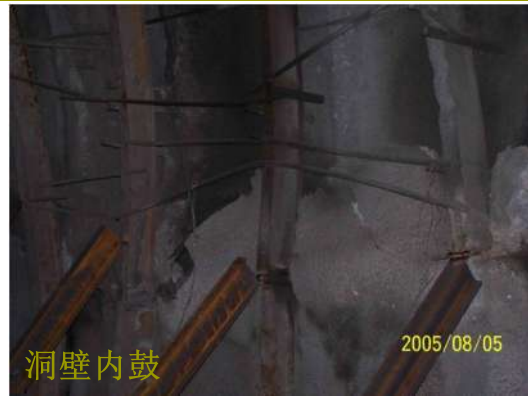
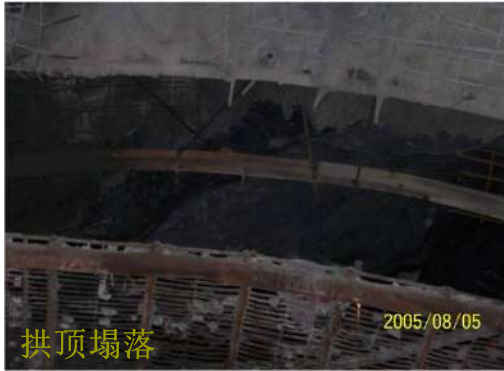


青藏铁路某隧洞顶拱及边墙变形、破坏情况示意图  
(据胡海涛等, 1979)

## 2.1 基本概念及研究意义

精品课程

都汶路  
龙溪隧道



## 2.1 基本概念及研究意义

精品课程



## 2.2 岩体天然地应力状态的形成及其类型

精品课程

### 2.2.1 天然地应力的形成

产生地应力的原因十分复杂，至今尚不完全清楚。

岩体中的天然应力一般都是有多种力联合作用的结果。在不同的地区，地应力场中几种应力所占的比例很不相同，但通常是**岩体自重**（即自重应力）和**地壳运动产生的应力**（即构造应力）占优势。

一般来讲，可将地应力分为区域因素产生的应力和局部因素产生的应力。区域因素作为控制性因素，形成一个地区应力场的基本骨架；而局部因素仅作为影响因素，使地应力发生局部变化。

## 2.2 岩体天然地应力状态的形成及其类型

精品课程

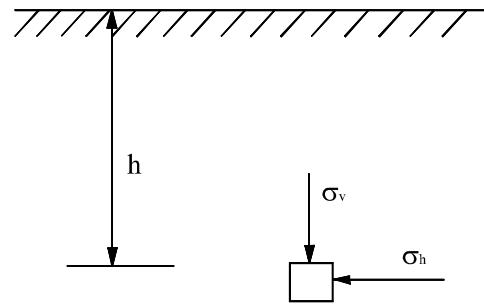
### 2.2.1.1 重力作用

岩体在重力场作用下形成自重应力，重力应力场是各种应力场中唯一能够计算的应力场。

在地表近于水平的情况下，重力场在岩体内某一任意点上产生相当于上覆岩体重量的垂直应力 $\sigma_v$ ：

$$\sigma_v = \gamma h$$

相当于该点三向应力中的最大主应力。



## 2.2 岩体天然地应力状态的形成及其类型

精品课程

另外，由于泊松效应（即侧向膨胀）造成水平正应力 $\sigma_h$ ，相当于三向应力中的最小应力：

$$\sigma_h = \frac{\mu}{1-\mu} \sigma_v = K\sigma_v$$

式中： $\mu$ 为泊松比， $K$ 称为侧压力系数。

对大多数坚硬岩体： $\mu$ 为**0.2~0.3**，即 **$K$ 为0.25~0.43**。

对于半坚硬岩体： **$K$ 大于0.43**，且当上覆荷载大，下伏岩体呈塑流时， $\mu$ 接近**0.5**， **$K$ 近于1**，即近似于静水应力状态。

## 2.2 岩体天然地应力状态的形成及其类型

精品课程

### 2.2.1.2 地质构造运动

在地壳表层一定深度范围内存在较强的构造应力场。

地壳运动在岩体内形成的应力称为**构造应力**。可分为活动的构造应力和剩余的构造应力两类。

**活动的构造应力**：即狭义的地应力，指地壳内现在正在积累的能够导致岩石变形和破裂的应力。

**剩余的构造应力**：是古构造运动残留下来的应力。对于这种应力是否存在有不同的认识。根据应力松弛观点，认为在一次构造运动的数万年后，该次构造应力因松弛效应而不复存在。但**加拿大地盾**苏必湖地区的应力实测资料显示，剩余构造应力仍然十分明显。

## 2.2 岩体天然地应力状态的形成及其类型

精品课程

### 2.2.1.3 岩浆侵入

岩浆侵入挤压、冷凝收缩和成岩等过程，均会在周围岩体中产生相应的应力场，其过程也是相当复杂的。

熔融状态的岩浆处于静水压力状态，对其周围施加各向相等的均匀压力。但是，炽热的岩浆侵入后即逐渐冷凝收缩，并从接触界面处逐渐向内部发展。不同的热膨胀系数及热力学过程会使岩浆自身及其周围岩体应力产生复杂的变化。

与上述两种应力场不同，由岩浆侵入引起的应力场从宏观上仅属于一种局部应力场--**变异应力**，即岩体的物理、化学变化及岩浆的侵入等引起的应力。具体来说是岩体的物理状态、化学性质或赋存条件的变化引起的，通常只具有局部意义。



## 2.2 岩体天然地应力状态的形成及其类型

精品课程

- ◆ **残余应力**：承载岩体遭受卸荷或部分卸荷时，岩体中某些组分的膨胀回弹趋势部分地受到其它组分的约束，于是在岩体结构内形成残余的拉、压应力自相平衡的应力系统，此即残余应力。（《工程地质分析原理》第**2**版）

## 2.2 岩体天然地应力状态的形成及其类型

精品课程

### 2.2.2 天然地应力的类型

地壳岩体的天然应力状态是上述诸力在一个具体地区以特定方式联合作用的结果。它取决于地区的地质条件和岩体所经历的地质历史。地壳岩体天然应力主要包括以下三种典型类型：

#### 2.2.2.1 三向相等的静水应力式

由瑞士地质学家海姆于1905-1912年提出，他以岩体具有蠕变的性能为依据，认为地壳岩体内某一点处各方向地应力量值基本相等，均等于上覆岩层的自重，即：

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = \gamma h$$

静水应力式地应力状态仅在某些特殊条件存在。如中欧地区强烈构造变形的沉积岩、阿尔卑斯山深埋隧道岩体中的应力状态。

## 2.2 岩体天然地应力状态的形成及其类型

精品课程

### 2.2.2.2 竖直应力为主

地壳岩体内的应力主要是重力场作用下形成的自重应力，其竖直和水平主应力可按下列式确定。

$$\sigma_v = \gamma h$$

$$\sigma_h = \frac{\mu}{1-\mu} \sigma_v = K \sigma_v$$

以竖直应力为主的应力状态，也主要存在于某些特殊地质条件和局部地区，主要出现在以下几种情况和地区。

## 2.2 岩体天然地应力状态的形成及其类型

精品课程

(1) 构造活动较弱或受构造运动影响较小的区域及新近沉积地区，岩体中的地应力主要由岩体自重产生。

(2) 以拉张应力为主的局部地区（大洋中脊轴部地带、活动正断层地带、拉张断陷盆地）地壳浅表层岩体中的应力往往呈现出最大主应力 $\sigma_1$ 竖直，其余两个主应力水平的三向应力状态。

(3) 构造运动作用的深度是有限的，到地球内一定深度后岩体的应力状态可能会从以水平应力为主转为以垂直应力为主。目前最深的应力测量已达5000余米，这些测量资料反映了构造应力作用的深度及应力状态随深度发生变化的情况。如：南非金矿--600m深度范围内水平应力超过垂直应力，在600m以下水平应力则小于垂直应力。冰岛--大约在200余米深度上水平应力与垂直应力的关系发生了变化；日本--获得的结果与南非的结果相似。

## 2.2 岩体天然地应力状态的形成及其类型

精品课程

### 2.2.2.3 水平应力为主

地壳岩体内的应力主要受构造运动影响，其最大主应力近于水平。近些年来，大量的震源机制资料和地应力实测资料表明，在绝大多数地区，**最大水平主应力普遍大于竖直应力**，

早在上世纪二十年代，我国著名地质学家**李四光**教授就指出，地壳运动以水平运动为主，**地应力场是以水平应力为主导的**。到五十年代，瑞典学者N.哈斯特通过在芬-斯地块的矿山岩体应力测量工作，证实该地区应力场以水平应力为主。

## 2.2 岩体天然地应力状态的形成及其类型

近年来，大量的震源机制资料和应力实测资料揭示出地壳岩体内的应力状态存在着不同的类型，主要包括以下三种典型情况：

(1) 中间主应力 $\sigma_2$ 近于垂直，最大主应力 $\sigma_1$ 和最小主应力 $\sigma_3$ 近于水平。

在这种应力状态下，地壳岩体的破坏形式必然是沿走向与最大主压应力成约 $30^\circ \sim 40^\circ$ 左右交角的陡立面产生走向滑动性的断裂活动。

此类三向应力状态称为：

“潜在走向滑动型”。

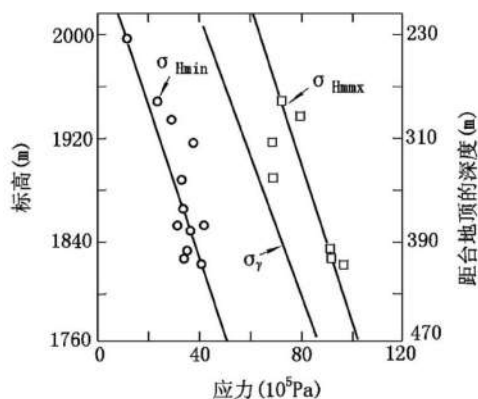


图2—2 内华达试验场以水力压裂法测得的三向应力状态  
(据海穆森, 1978)

## 2.2 岩体天然地应力状态的形成及其类型

(2) 最小主应力轴 $\sigma_3$ 近于垂直，最大主应力 $\sigma_1$ 与中间主应力 $\sigma_2$ 轴近于水平。

在此种应力状态下，地壳岩体的破坏形式必然是逆断型的，即沿走向与最大主应力垂直的剖面X裂面产生逆断活动，故可称为-“潜在逆断型”。

喜马拉雅山的前缘地区属于这种类型。

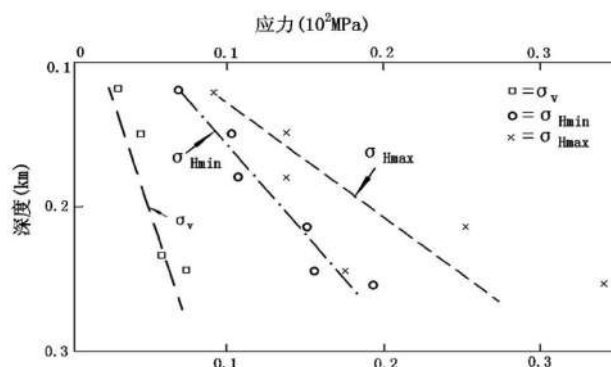


图2—4 以水力压裂法测得的美国歹溪 (Bad Creek) 地区的三向应力状态 (据海穆森, 1978)

## 2.2 岩体天然地应力状态的形成及其类型

### (3) 最大主应力轴 $\sigma_1$ 垂直，其余两主应力水平分布。

此应力状态下，地壳岩体的破坏形式必然是沿走向与最小主应力轴相垂直的面，发生正断性质的活动，故可称为“**潜在正断型**”。

我国青藏高原中部存在这种类型。地处大洋中脊轴部地带的冰岛地区测得的应力状态就是这种类型。

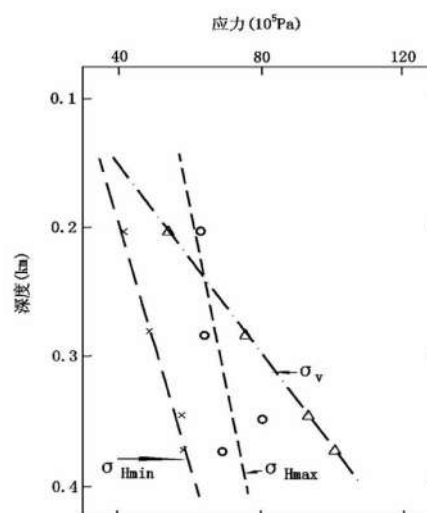


图2—5 水力压裂法测得的冰岛雷克雅未克地区的三向应力状态  
(据海穆森, 1978)



## 2.2 岩体天然地应力状态的形成及其类型

精品课程

上述为三种典型情况，大多数地区接近其中某一种，有些地区应力状态属主应力轴倾斜的过渡类型。

总之，大量实测资料表明，世界上大多数地区岩体内的天然应力状态是以水平应力为主。这就足以证明，构造因素在地壳岩体的天然应力状态的形成中起着主导作用。

## 2.2 岩体天然地应力状态的形成及其类型

精品课程

### 2.2.3 天然地应力分布的一般规律

2.2.3.1 地应力是一个具有相对稳定性的非稳定应力场，是时间和空间的函数

不同地区天然应力状态的类型往往不同，同一地点不同深度范围内的天然应力状态类型也可能会有所差别。在绝大多数地区，某一处地应力随深度变化可能会从以水平应力为主的应力状态转化为以竖直应力为主的状态，两者转化的临界点可能为静水应力式状态。

地应力在空间上的变化，受各种因素（如地层岩性、地形地貌等）的影响，从小范围来看，其变化往往非常显著，但就某个地区整体而言，地应力的变化不会太大，其量值和方向一般均具有宏观的规律性。

某些地震活动活跃区，地应力的大小和方向随时间的变化非常明显。在地震前，处于应力积累阶段，应力值不断升高，而地震时使集中的应力得到释放，应力值突然大幅度下降。

## 2.2 岩体天然地应力状态的形成及其类型

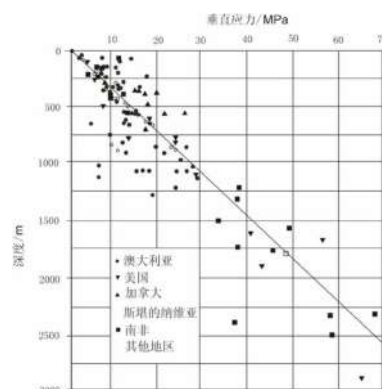
精品课程

### 2.2.3.2 实测垂直应力基本接近于上覆岩层的重量

实测垂直应力 $\sigma_v$ 统计分析表明，深度为25~2700m的范围内， $\sigma_v$ 呈线性增长，大致相当于按平均重度 $\gamma=27\text{kN/m}^3$ 计算出来的重力 $\gamma H$ 。

我国大陆地区450组地应力测试资料的统计分析发现，我国垂直应力总体上等于上覆岩体自重(见图2-4)，垂直应力可表示为 $\sigma_v=0.0271H$ 。可见在埋深约500 m 范围内，实测 $\sigma_v$ 总体上稍大于岩体自重。

值得注意的是，世界上多数地区的地应力并不完全与水平面垂直或平行，但大多数测点都发现确有一个主应力接近于竖直方向。说明地应力的竖直分量主要受重力控制，但也受到其它因素的影响。



世界范围内垂直应力随深度的变化

## 2.2 岩体天然地应力状态的形成及其类型

精品课程

### 2.2.3.3 水平应力普遍大于竖直应力

绝大多数地区具有两个主应力位于水平或接近水平的平面内。最大水平主应力 $\sigma_H$ 普遍大于竖直应力 $\sigma_v$ 。

$\sigma_H/\sigma_v$ 一般为**0.5~5.5**，在很多情况下大于**2**。

地壳浅层岩体平均水平应力也普遍大于竖直应力。竖直应力在多数情况下为最小主应力，在少数情况下为中间主应力，只有在个别情况下为最大主应力。

表2-1 世界各国平均水平主应力与竖直主应力的关系(引自苏生瑞等，2002)

	$\sigma_H/\sigma_v$			$\sigma_H/\sigma_v$
	<0.8	0.8~1.2	>1.2	
中国	32	40	28	2.09
澳大利亚	0	22	78	2.95
加拿大	0	0	100	2.56
美国	18	41	41	3.29
挪威	17	17	66	3.56
瑞典	0	0	100	4.99
南非	41	24	35	2.50
前苏联	51	29	20	4.30
其它地区	37.5	37.5	25	1.96

## 2.2 岩体天然地应力状态的形成及其类型

精品课程

### 2.2.3.4 最大水平主应力和最小水平主应力也随深度呈线性增长

大量的实测资料表明，与垂直应力类似，世界各地的水平主应力也随深度呈线性增长关系。

我国最大水平主应力和最小水平主应力随埋深的分布情况，其线性关系非常明显。 $\sigma_H$  和  $\sigma_h$  两者量值上具有一定的差异，尤其是越接近地表，差异就越大。

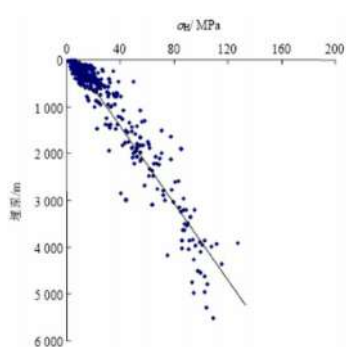


图2-5 我国最大水平地应力随埋深分布图  
(景锋等,2007)

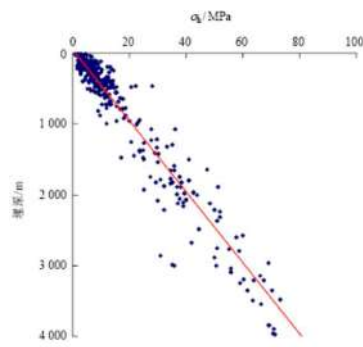


图2-6 我国最小水平主应力随埋深分布图  
(景锋等,2007)

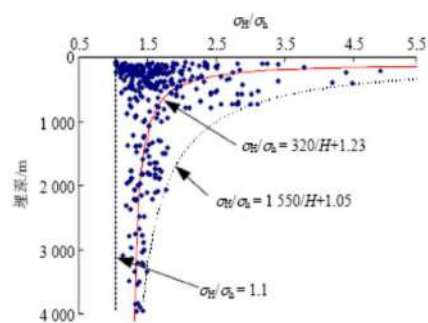


图2-7 我国最大和最小水平主应力之比随埋深分布图  
(景锋等,2007)

## 2.3 我国地应力场空间分布的一般规律

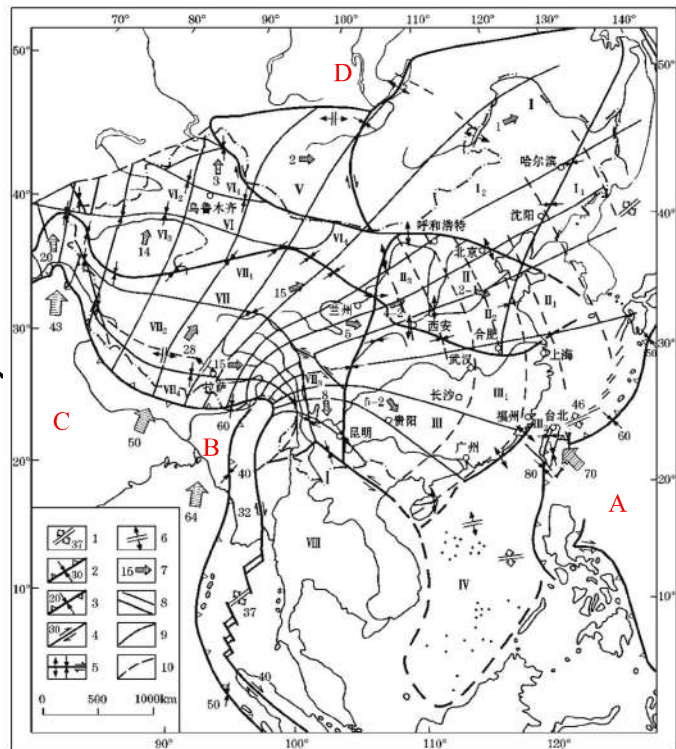
精品课程

### 2.3.1 地应力场空间分布及其与板块构造关系

#### 2.3.1.1 我国地应力场的空间分布特点

活动构造、震源机制解、  
地应力实测 →  
我国现代的构造应力场格局  
具有以下特点：

中国及邻区现代构造应力场 (马杏垣, 1987)



## 2.3 我国地应力场空间分布的一般规律

精品课程

### 1、最大主应力轴空间展布的规律性

(1) 最大主应力轴近于水平，并由西部内陆中心向沿海呈放射状分布；  
最小主应力也近于水平，  
并沿向东凸出的弧形呈环状分布。

(2) 大致以东经 $105^{\circ}$ 的南北地震带为界，西部为近南北向，  
东部则为近东西向。

**西部地区**的南部为接近南北向，  
向北逐渐转为NNE-NE向；

**东部地区**的北部（东北地区）  
为NE向，向南逐渐由华北的近  
东西向转为华南的南东向。

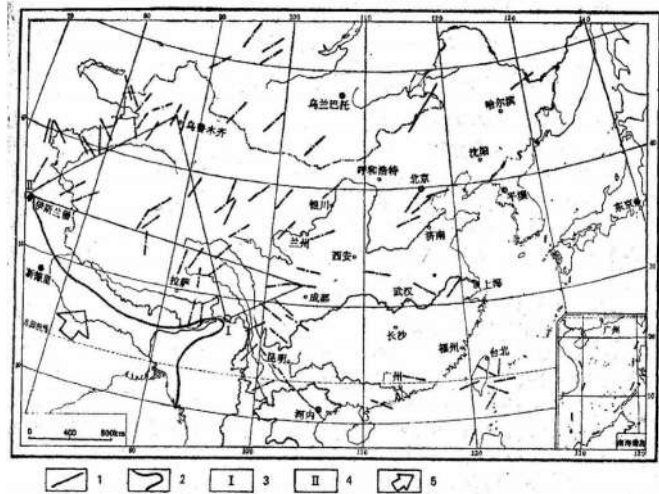


图 2-18 我国现代地应力场的最大主应力方向及其简易推断法

1—实际最大主应力方向；2—板块碰撞接触线；3—断裂；4—伊斯兰堡；5—印度板块推进方向

## 2.3 我国地应力场空间分布的一般规律

精品课程

### 2、三向应力状态空间分布的规律性：

#### (1) “潜在逆断型”应力状态区

主要分布于喜马拉雅山前缘一带。特点：

\*两个水平主应力均大于垂直主应力，强烈水平挤压区。

\*最大主应力的方向总体近南北向，垂直于主要山脉走向。

\*地震 -- 平行于山脉走向的断层逆冲活动。

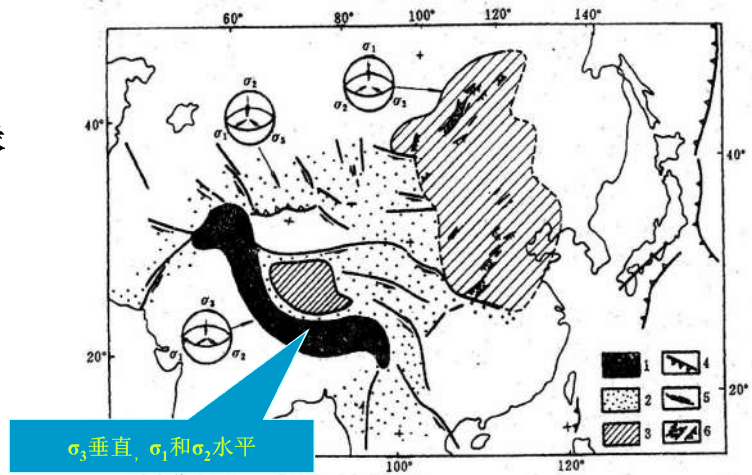


图 2—19 我国境内现代地应力场的空间分带情况

(据莫尔纳等, 1977)

1—强烈挤压区；2—中等挤压区；3—引张区；4—逆断层；5—走向错动断层；6—正断层及地堑



## 2.3 我国地应力场空间分布的一般规律

精品课程

### (2) “潜在走滑型”

#### 应力状态区

主要分布在中西部广大地区，特点：

只有一个水平主应力大于垂直主应力，具中等挤压区的特征。

地震 -- 断层的走向滑动性质的再活动，且左旋型活断层较为发育。

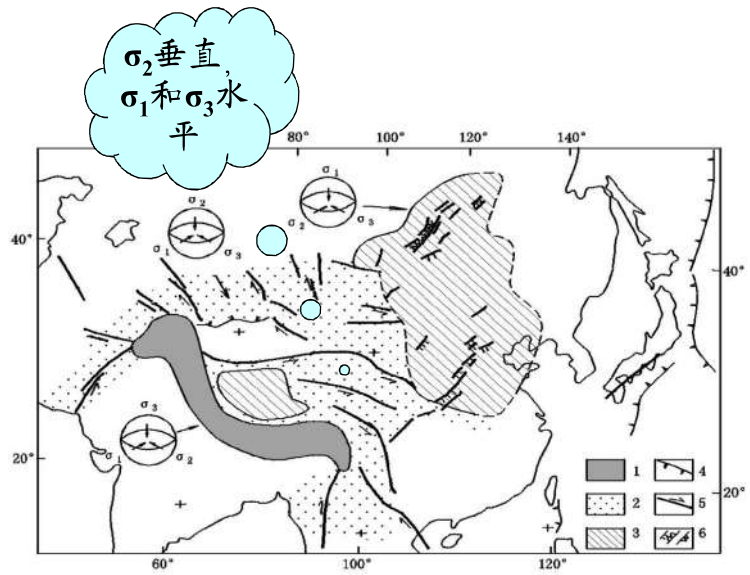


图2-19 我国境内现代地应力场的空间分带情况  
(据奥尔纳等, 1977)

1-强烈挤压区;2-中等挤压区;3-引张区;4-逆断层;5-走向错动断层;6-正断层及地堑;

## 2.3 我国地应力场空间分布的一般规律

精品课程

### (3) “潜在正断型”和“张剪性走滑型”应力状态区

东部和东北部 -- 华北平原、松辽平原及汾渭地堑等地区。主要特点：

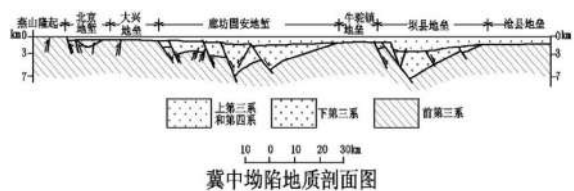
新生代以来正断层和地堑式断陷盆地十分发育，发育方向北东-北北东向。

此外，在青藏高原最高顶面分布范围内，存在着一个局部潜在正断型应力分布区，广泛地发育着可能是新生代晚期形成的近南北向的正断层和地堑式的断陷谷地。天然地震的震源机制 -- 正断型，主拉应力轴为近东西向。



图2-19 我国境内现代地应力场的空间分带情况  
(据莫尔纳等, 1977)

1-强烈挤压区; 2-中等挤压区; 3-引张区; 4-逆断层; 5-走向错动断层; 6-正断层及地堑;



冀中坳陷地质剖面图

## 2.3 我国地应力场空间分布的一般规律

精品课程

### 2.3.1.2 地应力场的形成与板块运动的关系

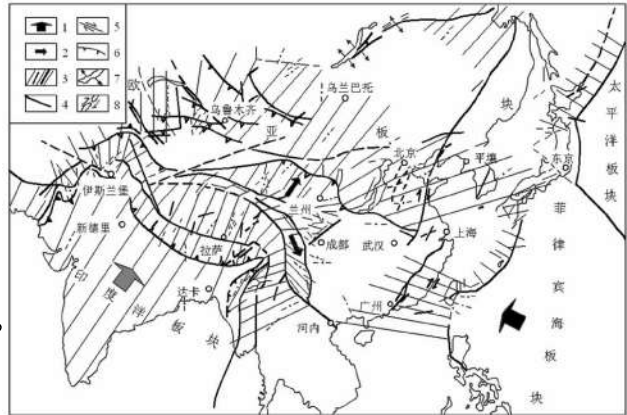
内在原因 -- 地壳运动方式和区域构造力来源问题。

现代地应力场主要是在周围**板块的联合作用**下形成的。

一般认为，白垩纪末印度板块向NNE方向推移，并在始新世和渐新世之间，即大约**3800**万年前与欧亚板块相碰撞。此后，印度板块仍以每年约**50mm**的速率向NNE方向推进。但由于在帕米尔受阻较强而偏向东运动。

\*印度板块与欧亚板块之间巨大而持续的相互作用是控制我国西部地区地应力场的**主导因素**。

\*太平洋板块和菲律宾海板块则分别从北东东和南东方向向欧亚大陆之下俯冲，分别对华北和华南地区地应力场的形成**产生重大影响**。



## 2.3 我国地应力场空间分布的一般规律

精品课程

\*华北地区处于太平洋板块俯冲带的内侧，大洋板块俯冲引起地幔内高温、低波速的熔融或半熔融物质上涌并挤入地壳，使地壳受拉而变薄，**表面发生裂谷型断裂作用**。

这样形成的 NW-SE 向拉张和 太平洋板块与上地幔深处对欧亚板块的 SWW 向挤压相结合，决定了华北地区现代地应力场和新构造活动特征。

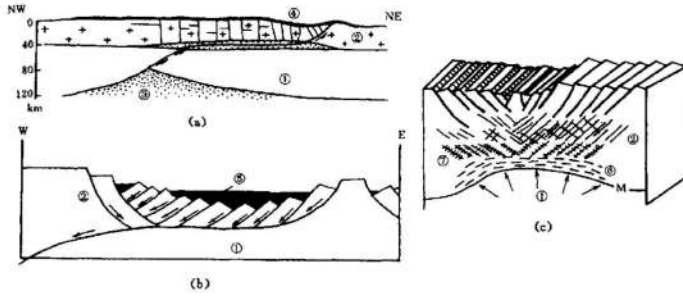
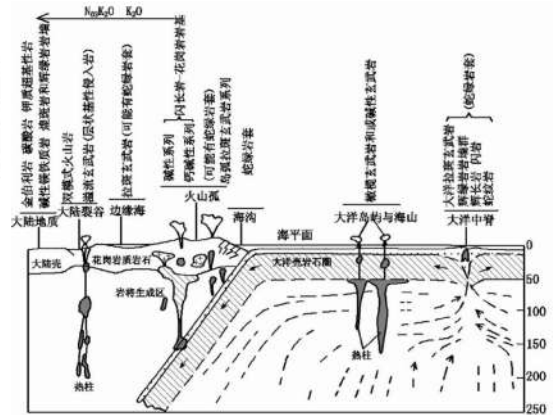


图 1—17 裂谷深部断裂的几种典型模式  
(据朱夏、许志琴, 1984)

(a) 埃塞俄比亚裂谷, 威尼克模式 (Kazmin, 1989); (b) 阿达尔裂谷犁式断裂模式 (示意图, Kazmin, 1981);  
(c) 中国东部对称犁式断裂模式

①—地幔; ②—地壳; ③—软流层; ④—岩浆及玄武岩流; ⑤—盘层; ⑥—叶理、片理; ⑦—韧性断层

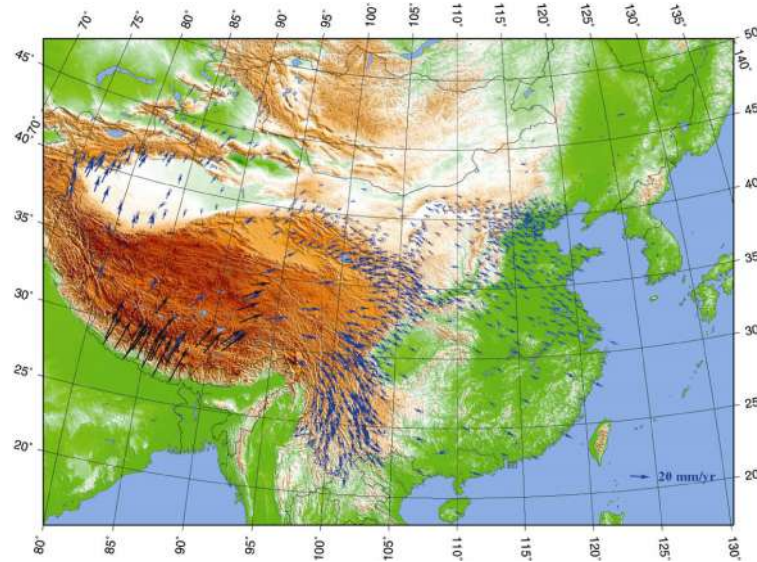


岩浆岩共生组合与板块构造环境的关系

## 2.3 我国地应力场空间分布的一般规律

精品课程

上述板块运动特征在近年来通过GPS测量到的我国形变场分布规律中得到验证。



中国境内现代形变场 (资料来源: 中国地震局)

## 2.3 我国地应力场空间分布的一般规律

精品课程

### 2.3.2 活断层活动与局部应力集中

#### 2.3.2.1 一般规律

各类断裂的发育往往使岩体内的应力状态变得极为复杂。

岩体受力变形时，不同方位的断裂应力的集中程度不同。通常那些与最大主应力成 $30^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 左右交角的断裂，尤其是呈雁行式或断续直线式排列的断裂组，其应力集中程度最高。

这类断裂最易于发展成为活动性断裂。

在此类断裂的不同部位，其应力集中情况又有明显的差别。通常在其端点、首尾错列段、局部拐点、分枝点或与其它方向断裂的交汇点，总之一切能对其继续活动起阻碍作用的地段，都将是应力高度集中的部位，这些地段常成为强震发生的特殊部位。

## 2.3 我国地应力场空间分布的一般规律

精品课程

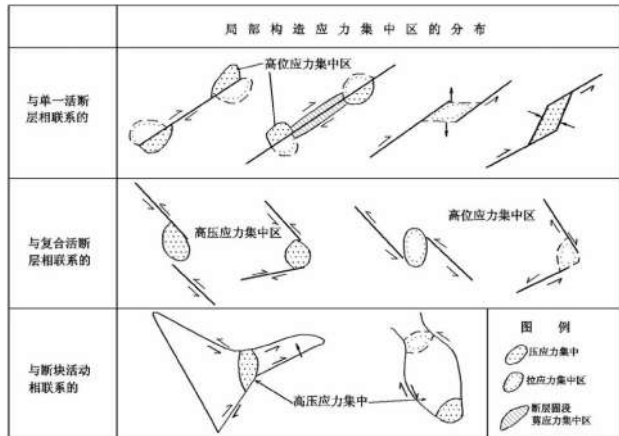
### 2.3.2.2 局部构造应力集中区的发育与活断层的关系

活断层 -- 现今地应力场中应力集中程度相对较高的断裂带，同时它的持续活动又将导致其附近地区应力进一步重新分布。

在活断层或活动断块的特定部位，往往形成很高的局部构造应力集中区。

\* **局部压应力集中区** -- 近代的隆起和推挤型构造的形成地带，往往伴有逆断型的强震活动；

\* **局部拉应力集中区** -- 近代的拗陷和拉分型构造的形成地带，有时伴有正断机制的地震。



局部构造应力集中区的发育与活断层的关系

## 2.3 我国地应力场空间分布的一般规律

精品课程

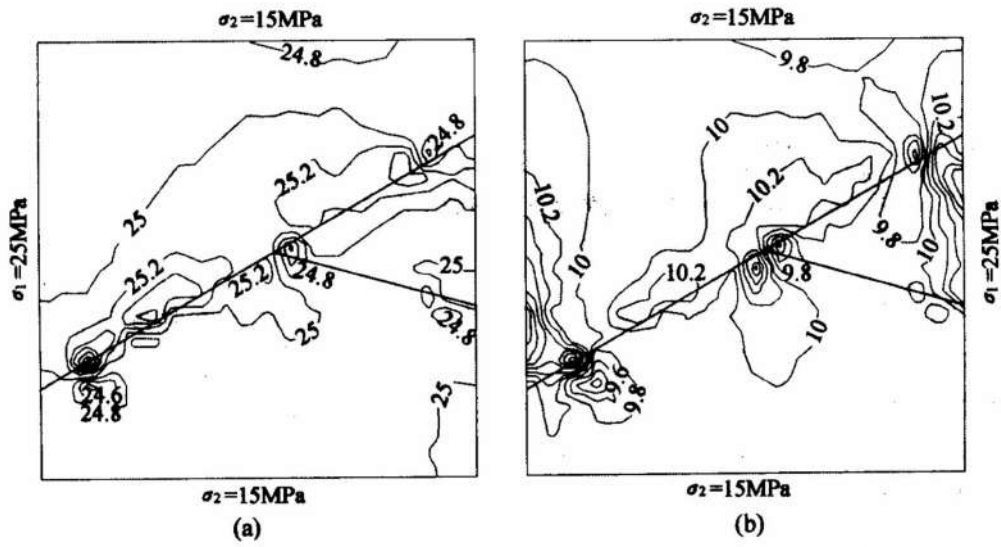


图 5-57  $\alpha=30^\circ, \gamma=45^\circ, K_b=1.67$ , 主断裂和分支断裂的内摩擦角分别为  $20^\circ$  和  $10^\circ$  时断裂交汇部位的最大主应力(a)和最大剪应力(b)(应力单位:MPa)



## 2.3 我国地应力场空间分布的一般规律

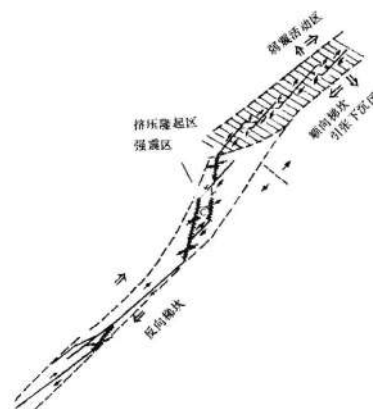
精品课程

例：圣安德烈斯断层

“反向和顺向梯坎”在同一条断层上的特定组合，形成一种特殊的构造-应力环境。

反向梯坎段，由于法向压应力的增大，其锁固能力显著增强，故这类区段通常能储聚大量应变能，是强震的孕震区。

在地壳受力变形过程中，反向梯坎的存在往往使相邻的平直段或顺向梯坎发育段遭受一定的侧向拉伸作用，从而使作用在这类区段断层面的法向压应力有所降低。因法向压应力降低而导致的锁固能力的减弱，往往就使与反向梯坎相邻接的平直段或顺向梯坎段成为无震或伴有弱震的蠕滑段。



## 2.3 我国地应力场空间分布的一般规律

精品课程

### 例：云南丽江地区

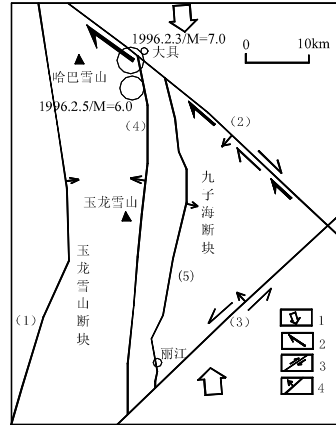
复合断裂构造对局部地应力场的影响。

在NNW~SSE向现今应力场的作用下，各单一断裂表现为：

NE走向的丽江—小金河断裂左旋走滑兼逆断；NW向的中甸—永胜断裂发生右旋走滑。

断裂的复合作用，使由断裂所夹持的三角形九子海断块的主体部分向西移动，断块尖端附近形成了局部的近EW向拉张应力集中环境。

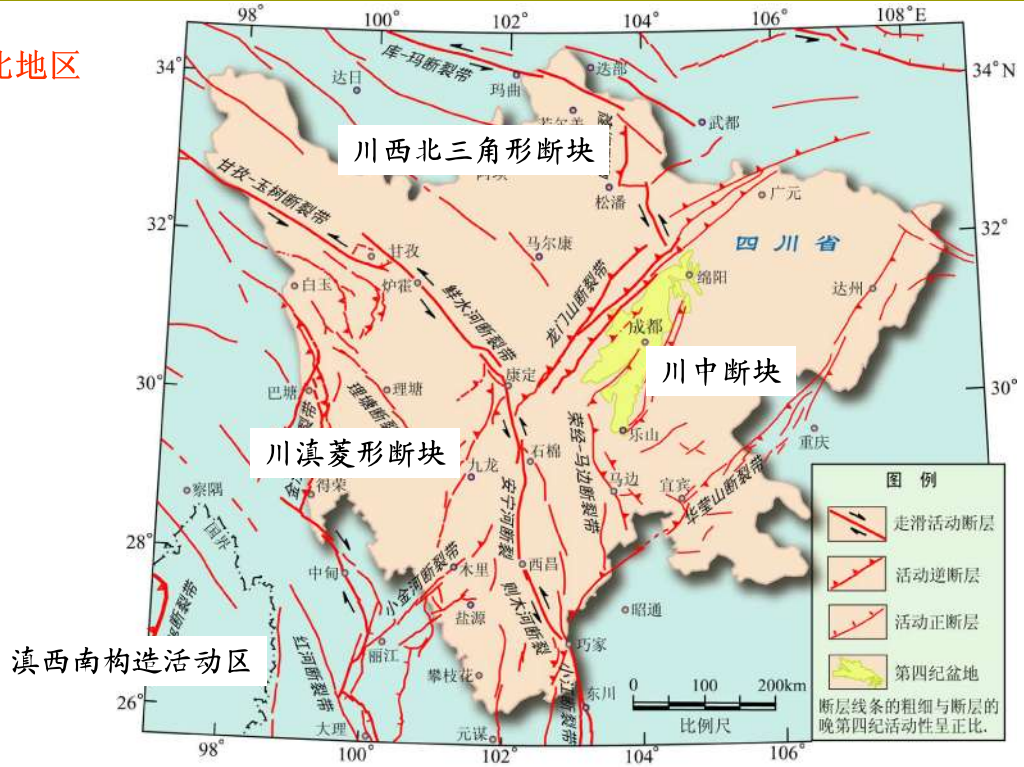
处于该部位的南北向玉龙雪山东麓断裂于1996年2月3日发生了正断错动，并导致7.0级丽江地震的发生。



## 2.3 我国地应力场空间分布的一般规律

精品课程

例：川西北地区



## 2.4 地壳表层地应力状态的复杂性

精品课程

- 影响地应力的因素很多：

岩体自重和构造作用力控制（主要的）；

各种地质构造、地形、岩性、剥蚀作用、岩石的物理化学作用、人类工程活动等。

多种因素的影响，使地壳表层地应力状态显得异常复杂。

## 2.4 地壳表层地应力状态的复杂性

精品课程

### 2.4.1 垂向卸荷

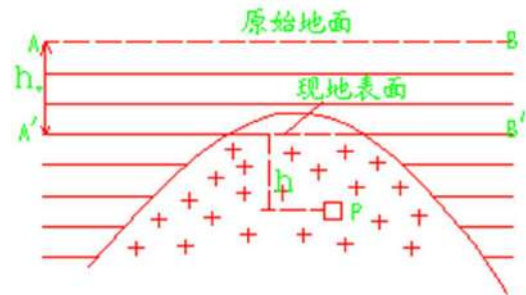
区域性的垂向剥蚀卸荷作用在增大岩体内的水平应力方面有着重要的作用。

例如：对于未受明显构造扰动的侵入体内应力状态的形成，一般经历了两个阶段：

首先是侵入阶段，由于岩体呈熔融状态侵入地下一定深处，故岩体中的应力呈静水应力式分布。

假定图中AB为原始地面，  
则岩体内任一深度 $h_0+h$ 处P点的  
应为：

$$\sigma_h = \sigma_v = \gamma(h_0 + h)$$



## 2.4 地壳表层地应力状态的复杂性

精品课程

此后，岩体经剥蚀而出露地表。

随着岩体剥蚀卸荷，岩体内的应力发生变化。垂直应力 $\sigma_v$ 与水平应力 $\sigma_h$ 的变化幅度不同。

假定剥蚀厚度为 $h_0$ ，则上述P点处的 $\sigma_v$ 和 $\sigma_h$ 分别变为：

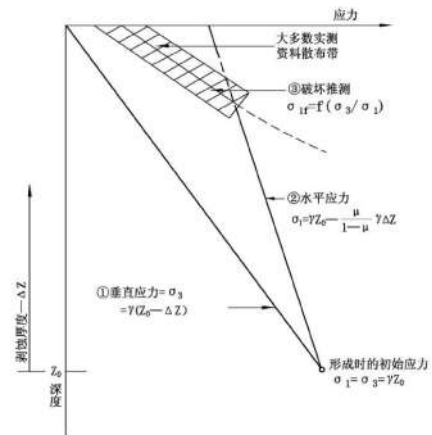
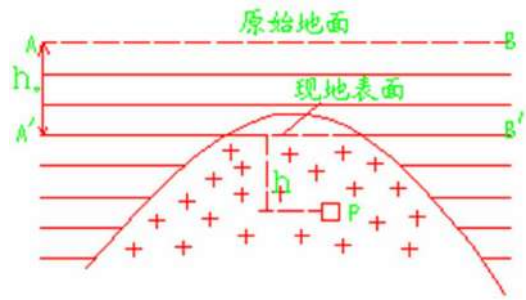
$$\sigma_v = \gamma(h_0 + h) - \gamma h_0 = \gamma h$$

$$\begin{aligned}\sigma_h &= \gamma(h_0 + h) - \mu / (1 - \mu) \times \gamma h_0 \\ &= \gamma h + ((1 - 2\mu) / (1 - \mu)) \times \gamma h_0\end{aligned}$$

可见地表卸荷在增大侵入岩体内水平应力方面起了重要作用。但卸荷作用在岩体内造成的高水平应力不具方向，即

$$\sigma_x = \sigma_y。$$

所以和构造作用造成的各向不等的水平应力相区别。



## 2.4 地壳表层地应力状态的复杂性

精品课程

### 2.4.2 河谷侵蚀侧向卸荷

河谷下切或边坡开挖过程中，随着边坡侧向应力的解除（卸荷），边坡产生回弹变形，边坡应力产生相应的调整，其结果是在边坡一定深度范围内形成**二次应力场**。

-- 应力降低区( $\sigma < \sigma_0$ )、应力增高区( $\sigma > \sigma_0$ )  
和原岩应力区 ( $\sigma = \sigma_0$ )。

黄润秋等人将边坡应力随深度的这种分布形式称之为“**驼峰应力分布**”。

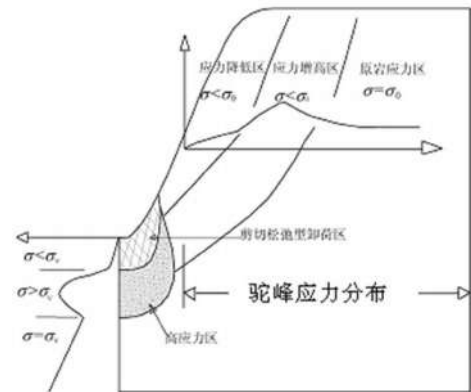
二次应力分布区 -

$\sigma_1$ 方向与坡面近于平行；

$\sigma_3$ 与坡面近于垂直；

$\sigma_2$ 与坡面走向基本平行。

在峡谷地区，河谷谷底往往也有明显的应力集中区，形成囊状的“**高应力包**”。



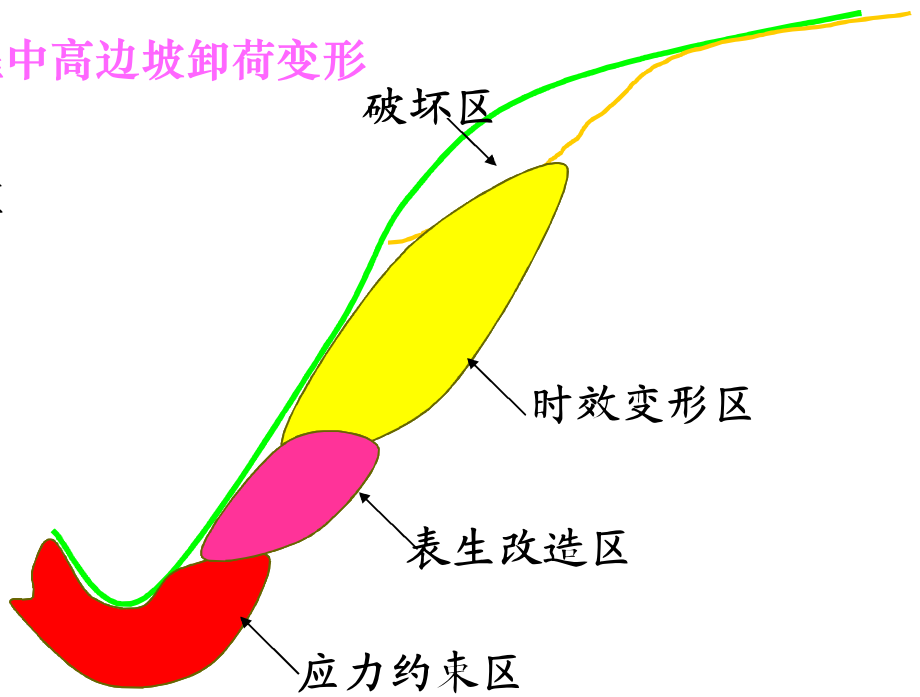
河谷高边坡应力分布模式(据黄润秋, 2001)

## 2.4 地壳表层地应力状态的复杂性

精品课程

### 河谷发育动力过程中高边坡卸荷变形

- (1) 强烈变形破坏区
- (2) 时效变形区
- (3) 表生改造区
- (4) 应力约束区





## 2.4 地壳表层地应力状态的复杂性

精品课程

### 2.4.3 地壳表层高地应力区及其地质地貌标志

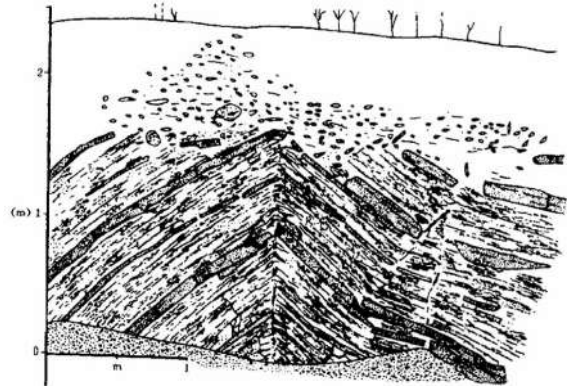
在近地表处的水平应力明显偏高地区，常见到一系列因应力释放而产生的岩体力学现象，这些现象可作为高地应力的地质、地貌标志。

#### 2.4.3.1 与天然条件下高水平应力有关的浅表生时效变形现象

##### 1. 隆爆现象

隆爆（POP-UP）-- 地表岩体中的一种“类构造”现象。表现为细长的隆褶或类似于低角度逆断层的断隆。

一般认为，这类隆爆是该区地表岩体中的一种与高水平应力释放有关的表生时效变形现象。



## 2.4 地壳表层地应力状态的复杂性

精品课程

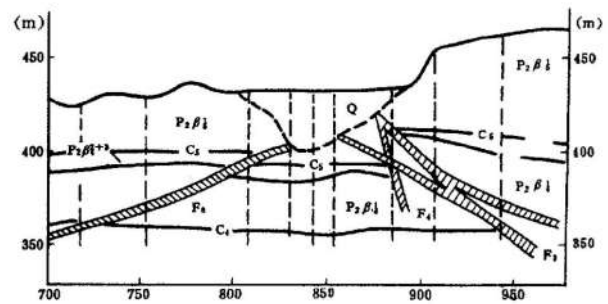
与上述隆爆现象类似的浅生时效变形 -- 大渡河铜街子电站坝址区。坝基岩体 -- 二叠系峨嵋山玄武岩，两次喷溢旋回的间歇面上，堆积了一套火山碎屑，岩性软弱。

构造 -- NNE向短轴背斜轴部，岩层被层间错动和缓倾角对冲断层（F3及F6）切割。

（1）层间错动带具有张扭性特征，错动方向指向河谷中部。

（2）两条对冲断层均为逆断层，却表现出张性特征，断距及倾角都由浅部向深部逐渐减小乃至尖灭及变平的趋势。

（3）断裂形成于 $Q_1$ ，距今约22~33万年的 $Q_2$ 中晚期已基本完成其发展过程。断层在河流深槽形成后仍有微量活动。



铜街子水电站坝基岩体结构示意图

## 2.4 地壳表层地应力状态的复杂性

精品课程

上述变形断裂结构不同于隆爆，是高地应力条件下宽阔河谷下切过程中垂直卸荷所导致的“应力释放型”浅生时效变形构造

(1) 量级较大的NWW向水平主应力和原始背斜构造，是这类时效变形构造生成的前提条件。

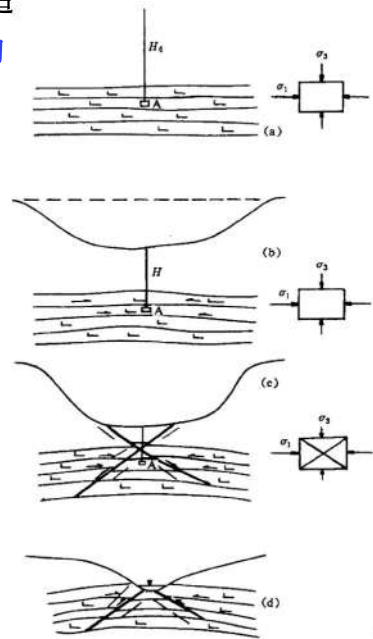
河谷形成前，岩体虽已处于较高的水平承载状态，因有足够大的竖向荷载与之相抗衡--保持总体稳定性。

(2) 走向与最大水平主应力相垂直的宽阔河谷的下切，是这类浅生时效变形构造形成的另一必要条件。

\*竖向应力减小，谷底的应力集中--河谷的水平应力增大。

\*随着河谷下切，岩体稳定条件逐渐恶化。形成应力释放型变形破裂。

\*岩层进一步上拱、沿层间软弱夹层错动，产生剖面“X”形破裂。



## 2.4 地壳表层地应力状态的复杂性

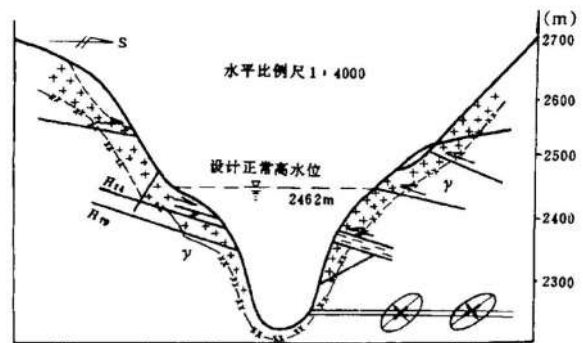
精品课程

### 2.谷下水平卸荷裂隙及谷坡内的水平剪切蠕变变形带

在高原应力区内较开阔的河谷，经常有一系列开口良好、透水性很强的水平卸荷裂隙发育。特别是在走向垂直于现今区域最大主应力方向的河谷段，这类卸荷裂隙往往尤为发育。

水平卸荷裂隙的形成机制与前述铜街子坝基浅生时效变形构造类似，不同的只是导致这类裂隙形成的区域水平应力的量级相对较低，所以变形仅局限于谷底岩层的微量上拱和沿层间或已有缓倾结构面的错动与拉开。

谷坡内的水平剪切蠕变变形带，是高原应力区常见的另一种“应力释放型”表生时效变形现象。



## 2.4 地壳表层地应力状态的复杂性

精品课程

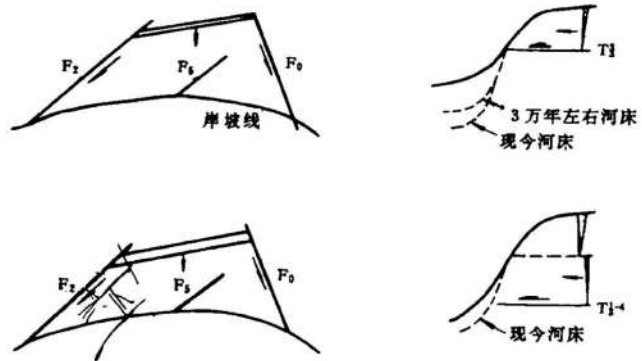
### 3. 应力释放型的深大拉张变形带

近年来，在雅砻江锦屏、金沙江向家坝等多个水电建设工程地质勘察过程中，发现在一些河谷岸坡中向坡内数百米深处还发现有**深大的拉裂缝和拉张陷落带**。这类拉张变形带以其规模大、延伸方向稳定及发育深而区别于通常的卸荷裂隙。

这种拉张变形的成因之一是特殊地质、地貌环境条件下，由河谷下切水平卸荷导致的“**应力释放型**”时效变形现象。

向家坝水电站马步坎高边坡的深大拉张变形就是这类应力释放型时效拉张变形的典型实例。

马步坎高边坡内楔形时效变形构造成因机理与发育演化过程示意图  
(见右图：左-平面图；右-剖面图)

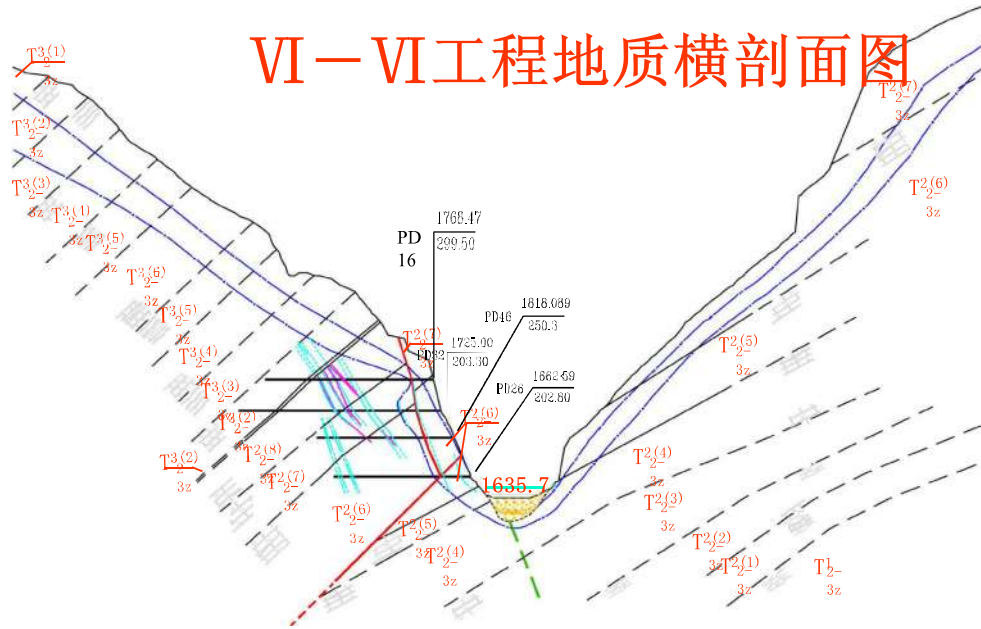


## 2.4 地壳表层地应力状态的复杂性

精品课程

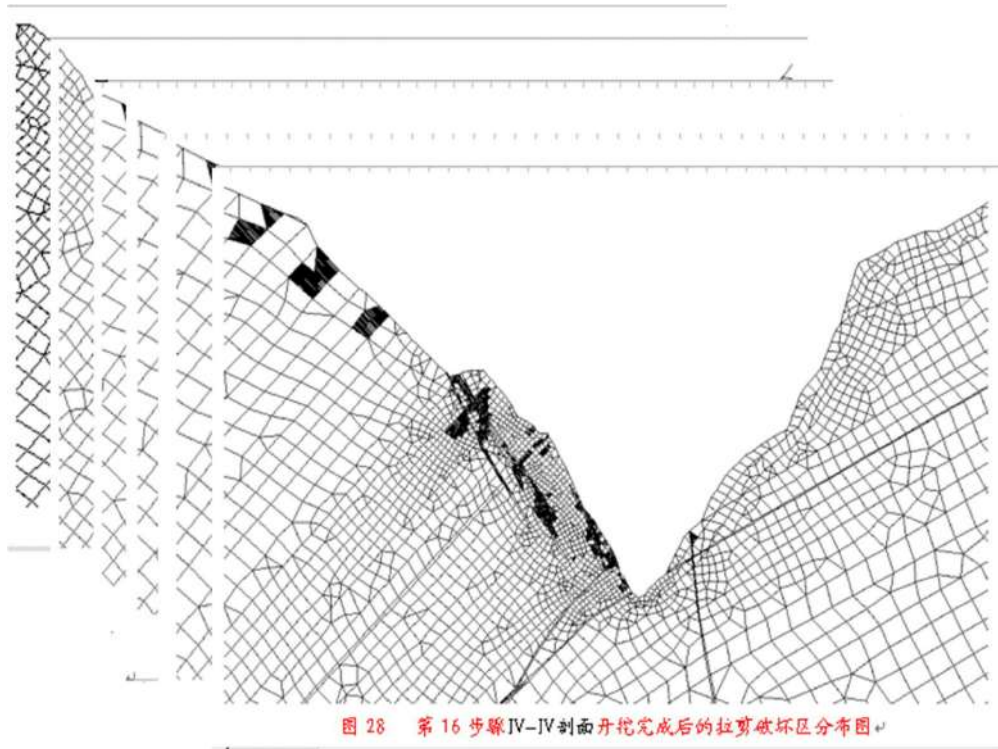
### 锦屏水电站普斯罗沟左岸高边坡卸荷

#### VI—VI工程地质横剖面图



## 2.4 地壳表层地应力状态的复杂性

精品课程



## 2.4 地壳表层地应力状态的复杂性

精品课程

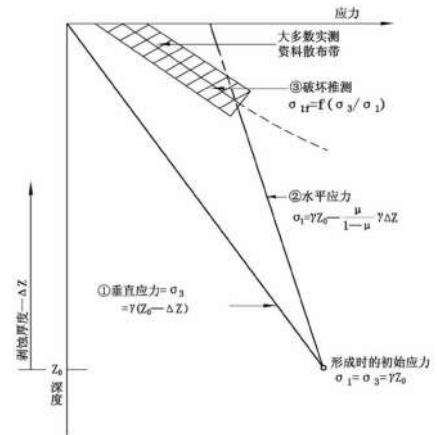
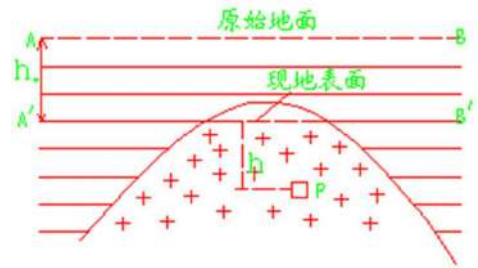
### 4. 蓆状裂隙

在出露于地表的侵入岩体内，广泛发育一种近水平平行分布的区域性裂隙。通常上部较密，向下逐渐变稀疏，这就是常称的蓆状裂隙。

“**应力释放型**”蓆状裂隙的形成机制 -- 与区域性剥蚀卸荷有关。

\*深埋于地下且处于静水应力状态的侵入岩体，在其遭受剥蚀而出露到地表时，岩体内各向同性的水平应力（相当于 $\sigma_1$ ）与竖直应力（相当于 $\sigma_3$ ）的差值不断增大。

\*当这种变化使岩体内的主应力差超过岩体所能承受的极限时，岩体即生成近水平的断裂，表部的高水平应力也因部分地释放而降低。





## 2.4 地壳表层地应力状态的复杂性

精品课程

### 2.4.2.2 与钻进有关的岩体应力释放及伴生的现象

#### 1. 岩芯“饼化”(rock core discing)现象

钻进过程中岩芯裂成饼状的现象，是高地应力区特有的一种岩体力学现象。

(1) 饼状岩芯的共同特征：平均厚度一般为岩芯直径的1/4到1/5；表面微呈槽状上凹，新鲜破裂面，无风化和浸染痕迹，多数隐约有顺槽擦痕和与之正交的拉裂坎。

(2) 钻进过程中差异性卸荷回弹的产物，破裂主要发生在一定高度的岩芯根部，是由拉张和剪切复合机制所导致的。

(3) 饼状岩芯的产生需具备特定的岩体力学条件 -- 弹性高、储能条件好的岩性条件；整体块状的岩体结构条件；高地应力条件，一般为 $\sigma_1$ 不小于30MPa，通常出现在河谷底部高应力区范围内。



## 2.4 地壳表层地应力状态的复杂性

精品课程

### 2. 钻孔周围岩体“葱皮化”现象

云南小湾水电站位于澜沧江中游的高山峡谷河段。在2003年~2005年的坝基建基面开挖过程中，表现出显著的**高地应力**现象，不仅出现了明显的岩芯饼裂化现象，在多个钻孔爆破孔断面，还发现岩体出现“葱皮化”现象。

“葱皮化”薄层岩片一般呈叠瓦式分布于钻孔周围，平面方向基本与钻孔轴垂直，两端微微上翘。其产生可能与爆破振动卸荷作用有关。岩片厚度在几mm~5cm，延伸长度一般在20~30cm。



## 2.4 地壳表层地应力状态的复杂性

精品课程

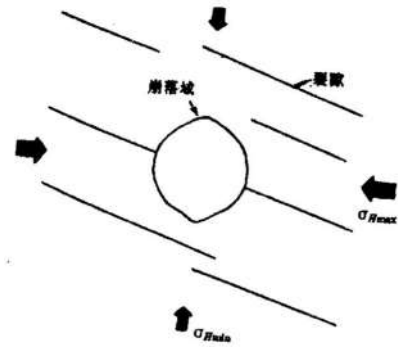
### 3. 钻孔崩落现象

在南非和加拿大西部地区发现一些钻孔的孔径并不呈圆形，而是在某一方向上孔径显著增大。这种孔径的增大是由于孔壁局部破损崩落所导致的。这种现象被命名为“钻孔崩落”（borehole breakout）。

（1）钻孔崩落的长轴方向垂直于该区内的水平最大主应力方向（图2-23），而与已有裂隙的发育方位无关；

（2）这种现象只见于厚层砂岩及粉砂岩内，而不产生在页岩中。

Mastin（1984）和Haimson（1972，1985）更通过物理模拟的方法在实验室内真实地再现了钻孔崩落现象，进一步证实了这一现象是由孔壁应力集中部位的局部破坏所引起的。



## 2.4 地壳表层地应力状态的复杂性

精品课程

Haimson (1985) 的实验 (图2-24) :

(1) 破裂首先出现于孔壁应力集中程度最高的A、A'点, 经四个阶段的发展而形成最终的崩落破坏域, 其水平最大主应力方向与长轴垂直。

(2) 破坏域侧向角 ( $\theta_b$ ) 的大小主要受岩石的强度参数及  $\sigma_h$  的控制。对于特定岩体来说,  $\theta_b$  与  $\sigma_h$  成如图2-26所示的直线关系。

(3) 破坏应力比与归一化的  $\sigma_h$  (即  $\sigma_h / C_0$ , 其中  $C_0$  为岩体的单轴抗压强度) 呈如图2-27所示的曲线关系。

通过这个实验, 不仅证实了钻孔崩落现象的力学成因, 而且为根据钻孔崩落现象的发育特征来确定地应力的方向和大小奠定了基础。

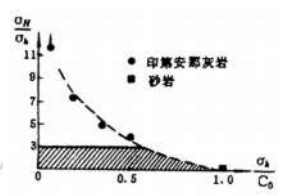
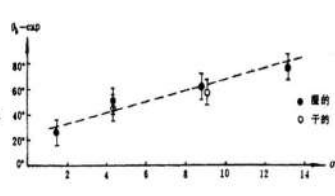
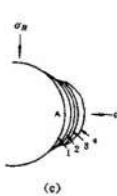
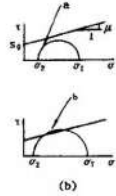
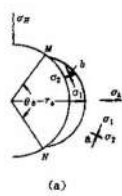
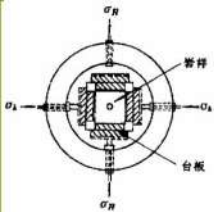


图2-24 钻孔崩落现象的物理模拟实验

图2-25 钻孔崩落过程中破坏域发展示意图

图2-26  $\theta_b$ 与 $\sigma_h$ 的实验关系图解

图2-27  $\sigma_H/\sigma_h$ 与 $\sigma_h/C_0$ 的关系图解

## 2.4 地壳表层地应力状态的复杂性

精品课程

### 2.4.2.3 与开挖卸荷有关的岩体应力释放及伴生的变形破坏现象

在高地应力区内，地表、地下工程岩体开挖中，常会引起一系列与卸荷回弹和应力释放相联系的变形、破坏现象。

#### (1) 基坑底部隆起、爆裂、板裂

加拿大安大略省露天采坑、美国南达科他州俄亥坝静水池基坑、云南小湾水电站坝基开挖过程中所发生的情况最为典型。

\*俄亥坝静水池基坑，最大挖深为61m。基坑底总回弹量达20cm，90%是在开挖期间发生的。基坑底面沿原断层面错开，逆断错距达34cm（见图2-28）。

\*云南小湾水电站坝基一定深度范围内出现了明显的“板裂”现象(图2-29)岩板厚3cm~20cm，裂面平直粗糙，总体产状与开挖面一致。



图2-28 俄亥坝静水池基坑开挖过程中岩体的变形、破坏情况示意图



图2-29 云南小湾水电站坝基开挖过程中建基面岩体中出现的板裂现象

## 2.4 地壳表层地应力状态的复杂性

精品课程

### (2) 边墙向临空面方向的水平位移和沿已有近水平结构面的剪切错动

我国葛洲坝水电站厂房基坝开挖过程中所发生的情况最为典型。

在加拿大的尼亚加拉地区的一个基岩明槽的开挖过程中。地壳水平初始应力 $14.8\text{MPa}$ ，开挖隧洞、竖井或明槽时普遍遇到岩体水平变形和破裂问题。为埋设下水管道而开挖明槽，槽壁岩体沿近水平层面向槽内滑移（如图2-30），历时5个星期，各层之间向槽内的总位移量达 $10\text{cm}$ 。平面上岩体向槽内的错移主要是沿一组与明槽轴呈 $15^\circ\sim 20^\circ$ 交角的近直立节理进行的，管道及混凝土顶底板均被错断。

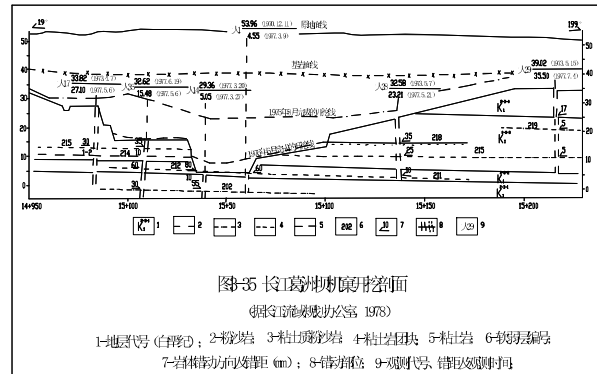
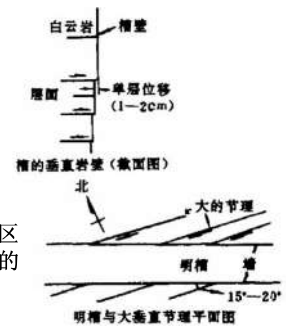


图2-30 加拿大尼亚加拉地区-基岩明槽开挖过程中岩体的变形和破裂



## 2.4 地壳表层地应力状态的复杂性

精品课程

### (3) 边墙或边坡岩体的倾倒。

在高地应力区，当地表开挖工作顺沿薄层陡倾岩层的走向进行时，与卸荷回弹和应力释放相联系的岩体变形与破坏的形式，主要是岩层的倾倒。

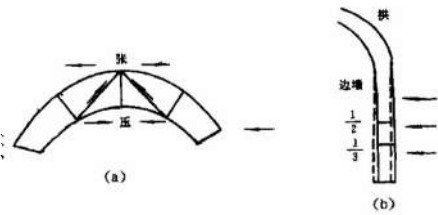
这类岩体变形在高地应力区可以是卸荷回弹和应力释放的产物，能够在很短(几天)的时间内发生。

岩体应力与各类地下建筑物的关系更是极为密切，实际上它是决定各类地下建筑物稳定性的主要因素。在高地应力区，伴随地下开挖所产生的岩体变形和破坏也有不同的类型。

- ①拱顶裂缝掉块；②边墙内鼓张裂；
- ③底鼓及中心线偏移；④施工导坑缩径；

穿过活动断裂带的地下工程，若频繁地出

高地应力异常现象，则可能是地震的前兆。



例：四川都(江堰)—汶(川)高速公路2007年在穿越龙门山断裂带时，隧道出现围岩大变形现象，隧道穿越须家河组煤系地层时，瓦斯异常突出，发生瓦斯爆炸和煤层自燃现象。一年之后（即2008年5月12日），发生了里氏8级的汶川特大地震。

## 2.5 区域地应力场及岩体地应力研究

精品课程

岩体的天然应力状态是极其复杂。

一方面取决于地区的地质、地貌发展史，同时又受岩性、局部构造、地形地貌影响。

因此，为了从定性、定量两个方面阐明一个地区岩体天然应力状态的总体特征，应采用下述的综合研究途径，

(1) 以地质、地貌方法研究该区构造应力场的演变史和现今地应力场的基本特征；

(2) 在此基础上选择一些有代表性的地点进行应力测定；

(3) 以这些点的应力实测资料和已掌握的应力集中区的发育分布为依据，对区域地应力场进行数值模拟和反演分析，由此建立区域地应力场的定量化模型。

实际上其过程可归结为：

自然历史分析 → 定量测定 → 区域应力场模拟分析



## 2.5 区域地应力场及岩体地应力研究

精品课程

### 2.5.1 构造应力场演变史及现今地应力场基本特征的地质地貌研究

#### 2.5.1.1 构造应力场演变史研究

对于构造应力场演变历史的研究，除可采用一般的地质力学方法外，还可以采用断层错动机制的赤平投影解析法。

断层错动机制解是根据断层形成时所产生的、且长期保存在断层附近岩体内的共生裂隙组合求得，能揭示出该断层的历次活动特点和当时构造应力场的基本特征。

通过大量测点处断层错动机制的赤平投影解析，配合各种构造形迹的地质力学分析，能全面掌握造成该区历次构造断裂活动的构造应力场特征，判定构造应力场的演变历史及最新构造应力场的特征。

## 2.5 区域地应力场及岩体地应力研究

精品课程

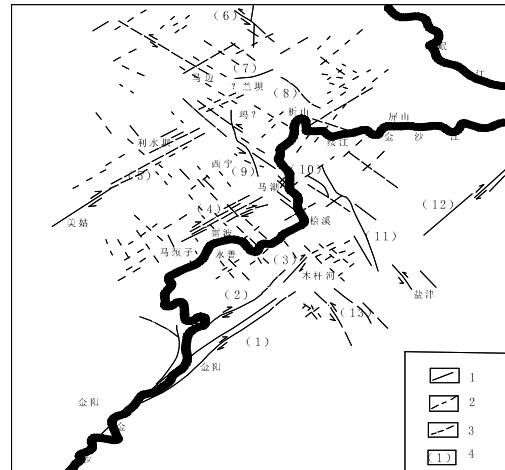
### 2.5.1.2 现今地应力场基本特征研究

近年来应用于研究现今地应力场的地质地貌方法包括新断裂网络地质地貌解析法和地震震源机制解析法。

**新断裂** -- 最新构造应力场下形成与发展的断裂。在一个特定的区域内，不同性质的新断裂往往构成一定形式的网络，客观地反映出最新构造应力场的特点。

构成新断裂网络的成分包括一对共轭的剪切面、一组压性结构面和一组张裂面。后二者一般发育较差，共轭剪裂面大多数表现为两组区域性剪裂隙。

一般认为，这类区域性剪裂隙是在蠕动条件下沿最大剪应力迹线形成的，其锐角等分线就是区域**最大主应力方位**。



## 2.5 区域地应力场及岩体地应力研究

精品课程

### 2.5.1.3 地应力积累条件和程度的研究

#### 1.历史上各时期及当代地壳隆起速度和高度

通过量测区域内各级阶地的绝对年龄和相对高程，定量判定各时期地壳隆起速度和高度，并结合历史时期的断裂活动情况，宏观总体地判明当前区内岩体应力积累的条件和程度。

#### 2.区内应力集中的条件和应力集中区的分布

在一个地区内有无应力集中条件及分布，主要取决于岩体的岩性及结构条件。岩性坚硬、结构有利的部位通常就是应力集中的部位。

#### 3.可作为高应力区标志的地质、地貌现象的发育和分布

河谷强烈卸荷回弹和应力释放的形迹、河床钻进过程中岩芯饼裂化现象、基坑或地下工程开挖过程中的岩爆和其它强烈变形现象等，都是与岩体内高应力的存在相联系的。这些现象集中发育的部位就是高应力集中区。

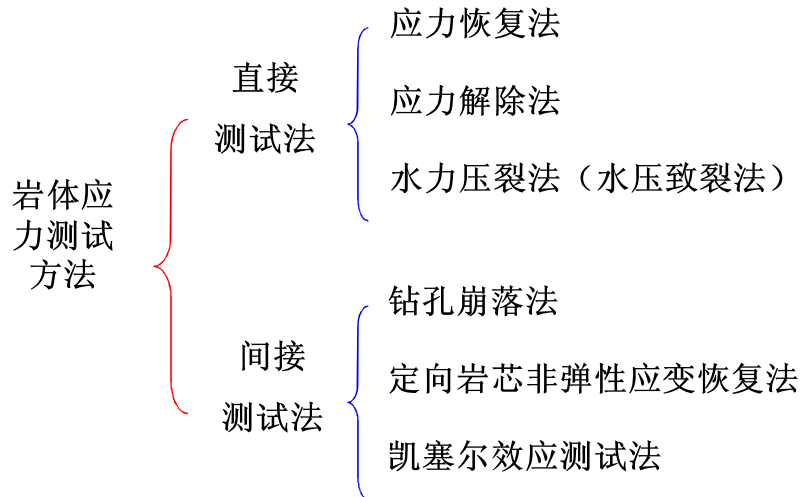
研究这些现象的发育、分布情况，不仅有助于判明区内是否有高应力区的存在，而且还可以帮助我们判断区域最大主应力方向。

## 2.5 区域地应力场及岩体地应力研究

精品课程

### 2.5.2 地应力的定量测定

目前岩体应力测量方法很多，分类也不尽一致，但归纳起来可分为直接测试法和间接测试法两类：



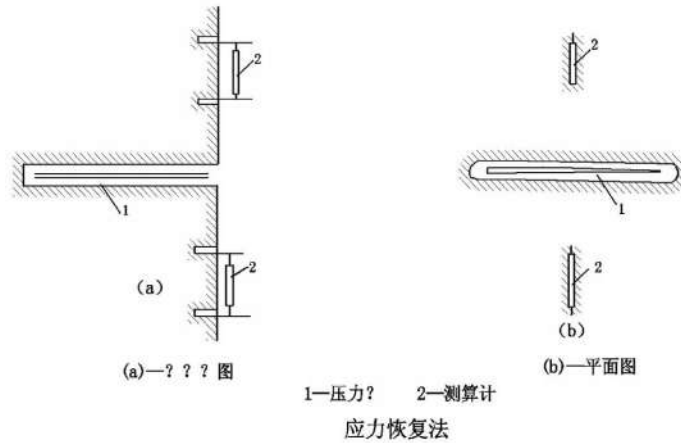
## 2.5 区域地应力场及岩体地应力研究

精品课程

### (1) 应力恢复法 (stress-recovery method)

当岩体应力被解除后，通过施加压力，使其恢复到原来的状态，以求得岩体应力解除前的应力值。

优点：在确定岩体的应力时，不需测定岩体的应力应变关系。



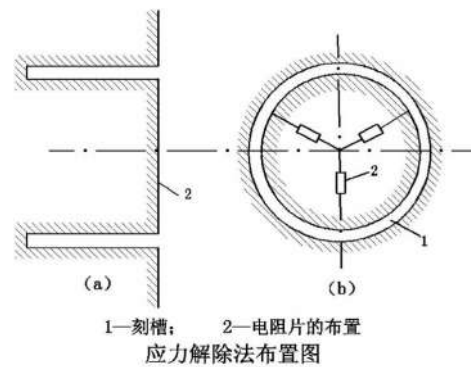
## 2.5 区域地应力场及岩体地应力研究

精品课程

### (2) 应力解除法 (stress-relief method)

在拟测点附近的一个小岩石单元周围切割出一个环状“槽子”，使得这一部分岩体处于卸荷状态。从刻槽前装置好的仪器测出由于这种应力解除而引起的应变反应。并根据有关岩石已知的应力—应变关系，精确换算出应力解除前岩体内三维主应力的大小和方向。

该方法以其精度高、测值稳定可靠等优点，被广泛应用于岩土工程设计、矿产开采、地震研究等方面。



## 2.5 区域地应力场及岩体地应力研究

精品课程

### (3) 水压致裂法 (hydraulic fracturing method)

通过钻孔向地下某深度处的测点段压液，用高压将孔壁压裂，然后根据破坏压力、关闭压力和破裂面的方位，计算和确定岩体内各主应力的大小和方向。

能有效地利用已有钻孔进行深部地应力测试，且具有操作简便、无须知道岩体力学参数等优点。

可获得垂直于钻孔平面的最大和最小应力量值和方向。对于垂直钻孔，由不同深度的测试数据，可得到最大和最小水平主应力随深度变化规律。对三个或三个以上的交汇钻孔进行测试，经过数据处理计算得到测点附近的三维应力状态。

## 2.5 区域地应力场及岩体地应力研究

精品课程

### (4) 钻孔测量崩落测量法

钻孔崩落现象是由孔壁应力集中部位的局部破坏引起的。崩落的长轴垂直水平最大主应力方向，崩落域侧向角 ( $\theta_b$ ) 及破坏应力比 ( $\sigma_H/\sigma_h$ ) 的大小，主要与岩石的性质及水平最小主应力有关。由此可求出该区水平最大、最小主应力的方向及大小。步骤如下：

①详细测量区内的钻孔崩落现象，并根据崩落域的长轴展布确定该区水平最大主应力和最小主应力。

②按照实际岩体条件进行模拟试验，求得  $\theta_b - \sigma_h$  直线关系，并根据实测  $\theta_b$  求出水平最小主应力 ( $\sigma_h$ ) 的量值。

③根据  $\sigma_h$  及实测的  $C_0$ ，利用图2-51即可得出区内水平最大主应力 ( $\sigma_H$ ) 的大小。



## 2.5 区域地应力场及岩体地应力研究

精品课程

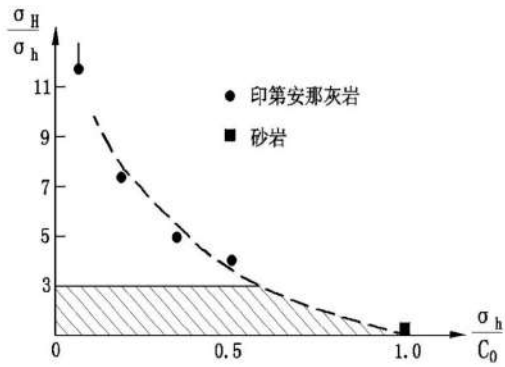


图2—51  $\sigma_H/\sigma_h$ 与 $\sigma_h/C_0$ 的关系图解

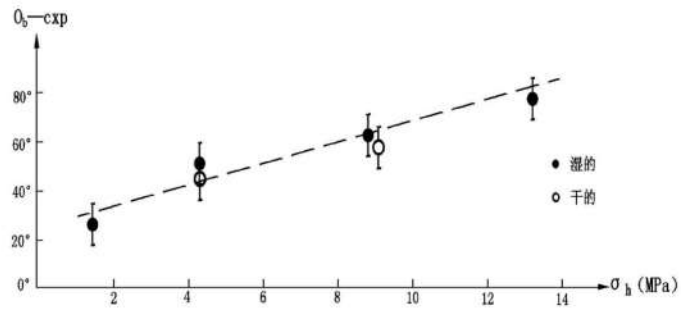


图2—50  $\theta_b$ 与 $\theta_h$ 的实验关系图解  
(据Haimson, 1985)

## 2.5 区域地应力场及岩体地应力研究

精品课程

### (5) 定向岩芯非弹性应变恢复测量法

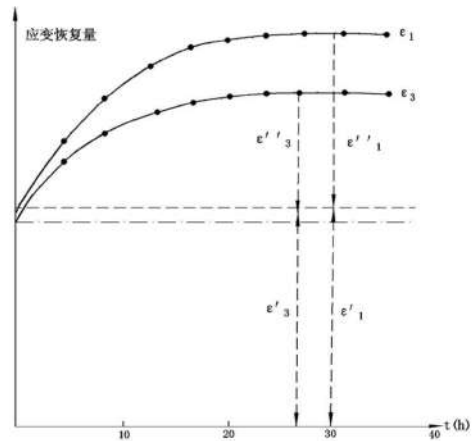
岩石应变恢复的性状有如图主要特征：

①岩石的总应变恢复量( $\epsilon$ )是由弹性应变恢复( $\epsilon'$ )和非弹性应变恢复( $\epsilon''$ )两部分所组成，且整个应变恢复的时间足够长，约达30余小时。

②在未发生非线性蠕变的条件下，主应变恢复的轴向与主应力方向一致，即： $\epsilon_1$ 、 $\epsilon'_1$ 、 $\epsilon''_1$ 、 $\epsilon'_2$ 、 $\epsilon''_2$ 、 $\epsilon''_3$ 、与 $\sigma_1$ 的方向一致，而 $\epsilon_3$ 、 $\epsilon'_3$ 、 $\epsilon''_3$ 与 $\sigma_3$ 的方向一致，且

$$\epsilon_1 = \epsilon'_1 + \epsilon''_1$$

$$\epsilon_3 = \epsilon'_3 + \epsilon''_3$$



## 2.5 区域地应力场及岩体地应力研究

精品课程

③如果发生非线性蠕变，最大弹性应变恢复轴与最大非弹性应变恢复轴的方向不同。此时，弹性应变恢复的轴向所反映的是较新的应力环境，非弹性应变恢复的轴向所代表的则是较老的应力环境。

④在整个应变恢复过程中，主应变比(无论是弹性或是非弹性的)与主应力比始终保持相等。

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_3} = \frac{\varepsilon'_1}{\varepsilon'_3} = \frac{\varepsilon''_1}{\varepsilon''_3} = \frac{\sigma_1}{\sigma_3}$$

测量的方法及步骤

①从钻孔中取定向岩芯。

②在岩芯内选三个不同方向的面，在每个面上的三个不同方向上进行应变恢复测量，然后根据测量资料计算三个主应变的方向及比值。

如果有一个主应力是垂直的，且其大小等于上覆层的重量。则只在水平面内的三个不同方向上进行应变恢复测量，求得两个水平主应变的方向及比值即可。

## 2.5 区域地应力场及岩体地应力研究

精品课程

### (6) 凯塞尔 (Kaiser) 效应测量法

#### 基本原理

1950年，德国学者J.Kaiser发现受单向拉伸力作用的金属材料，当应力达到并超过材料所受过的最大先期应力时，开始有明显的声发射现象出现，这就是著名的凯塞尔效应。

1963年，Goodman通过实验证实岩石也具有凯塞尔效应，从而为应用这一技术测定岩体应力奠定了基础。

70年代末期以来，日、美、中学者对这一问题开展了广泛的理论及实验研究，先后解决了凯塞尔效应方向独立性、三维地应力测量及试验过程中噪声的排除等问题，使凯塞尔效应在地应力测量领域已基本具有实用性。

## 2.5 区域地应力场及岩体地应力研究

精品课程

为了深入理解凯塞尔效应及其在地应力测量方面的应用，首先需对上述基本问题作简要的讨论。

### ①岩石凯塞尔效应的微观机理

岩石的声发射现象来源于其内部显微缺陷的受力扩展，而岩石的每一次受力，都会使其内部组织结构产生与荷载大小及方向相适应的显微破裂系统。再次加载时，一旦荷载达到并超过先期荷载，已有的裂纹即将进一步扩展，声发射随之开始大量持续出现，这就是凯塞尔效应的基本机理。

### ②岩石凯塞尔效应对地应力的记忆功能

一系列实测资料表明，利用凯塞尔效应测得的岩体应力远小于该岩体的破裂强度，而与用套钻法测得的现今岩体应力十分接近。通过对已有实测资料的深入分析，我们发现凯塞尔效应实际上只能记忆[晚近时期的应力](#)，而不能记忆古构造力。

之所以如此，看来这里有一个[显微破裂的愈合](#)问题。随着环境的改变，岩石的重结晶或新晶体生长作用，使那些古老的显微破裂焊接愈合，从而也就丧失对古构造应力的记忆能力。

## 2.5 区域地应力场及岩体地应力研究

精品课程

### ③多期凯塞尔效应

近些年来的研究发现，挽近时期遭受过方向和量值不同的多期应力作用的岩石，在其再次受力过程中可能出现多个声发射频数急剧增高点，分别对应不同的先期应力，这种现象可称为“多期凯塞尔效应”。

岩石多期凯塞尔效应的产生机制 -- 对于不同的主应力组合，岩石内部最易发生进一步破裂的缺陷方位不同。遭受过不同方向主应力组合作用的岩石，其内部将产生多个与各次受力相对应的显微破裂系统。当对这类岩石试件进行加压试验并记录其声发射现象时，随着压力的逐渐增大，每当

外荷载引起的应力达到与某一期应力相等的量级时，与之相对应的显微破裂就开始扩展，声发射的累计频数也就随之出现一次突增。

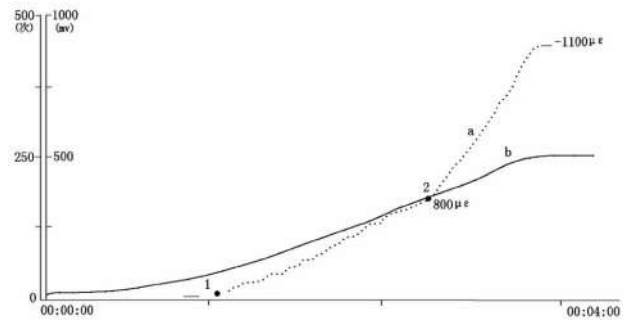


图2—53 岩石声发射测试曲线  
(a) AE累计数曲线; (b) 应变模拟电压曲线

## 2.5 区域地应力场及岩体地应力研究

精品课程

### ④测量结果的应用

与其它的应力测量方法不同，凯塞尔效应测量结果所揭示的并不是现存应力，而是岩体于晚近期所遭受过的最大应力。如果在此期间岩体曾遭受过不同应力场的作用，则通过多期凯塞尔效应，还可揭示出岩体晚近期的受力历史及每一期主应力的方向及其最大值。

由凯塞尔效应所揭示的最新应力场，在方向上必定与现存应力场相一致，而在量值方面则可能出现等于或大于现存应力的两种情况。导致出现后一种情况的主要因素可能是岩体的表生时效变形，也可能是活动构造应力的减弱。

## 2.5 区域地应力场及岩体地应力研究

精品课程

### 2.5.3 区域地应力场的物理及数值模拟

通过地应力的实际测量，可以较为精确地获取测点部位的地应力量值和方向，但也只能获取各测点的地应力状态，而不能得到整个地区宏观空间地应力场。

近年来，随着物理模拟、数值模拟技术的迅猛发展，尤其是数值模拟技术，如有限单元法、有限差分法等，使利用有限的测点应力实测资料来模拟和反演整个地区的空间应力场成为现实。

通过数值模拟研究，不仅可以依据区内一些点的应力实测资料反演现今区域地应力场，建立其现状的定量化模型，取得不同地段在应力—形变强度和发震能力方面的定量关系，而且可以通过改变外力或边界条件的系统分析，深入研究区域地应力场的形成演化机制和规律，为定量评价岩体稳定性及区域构造稳定性提供科学依据。



## 2.5 区域地应力场及岩体地应力研究

精品课程

### 2.5.3.1 模型的建立

通过对区域构造应力场演变史及现今地应力场基本特征的地质、地貌研究和部分地点岩体应力的实测，从宏观上掌握区域构造格架及区域应力—形变场发育的总体特征。以此为基础，通过适当地简化和抽象，建立一个尽量符合实际的地质—力学模型，是保证模拟研究成功的关键。

具体说来，模型的建立关键是要正确确定模型的下述特征：

- (1) 模型的范围、内部结构及各部分的物理力学参数；
- (2) 模型的边界条件及可能的外力作用方式；
- (3) 关键部位的主应力方向及大小。

## 2.5 区域地应力场及岩体地应力研究

精品课程

### 2.5.3.2 变形破坏机制的物理模拟研究

为考察模型建立的正确性和进一步研究岩体的变形破坏机制，比较有效的方法是进行相似材料的物理模拟研究。

该方法的要点：

根据抽象出地质—力学模型，用相似材料制成物理模拟模型，并在关键部位预埋各种传感器(应力、应变、孔隙水压力等)。

在物理模拟试验装置中施加外力和其它作用条件(如降雨、振动等)。随着外界条件的不断变化，实时收集和采集各传感器数据，仔细观察模型中所出现的各种现象，并用高速摄像机记录变形发展的全过程。

如果模拟试验的结果能完全再现地质体现场实际情况，则不仅证明了模型建立的正确性，而且还能深化对岩体变形破坏模式、作用机制以及宏观规律的认识和理解，为进一步的定量模拟计算和稳定性评价提供科学依据。否则，则需调整模型反复试验，直到得出满意的结果为止。这一过程实际上是一个对现场情况进行再研究、再认识的过程。

## 2.5 区域地应力场及岩体地应力研究

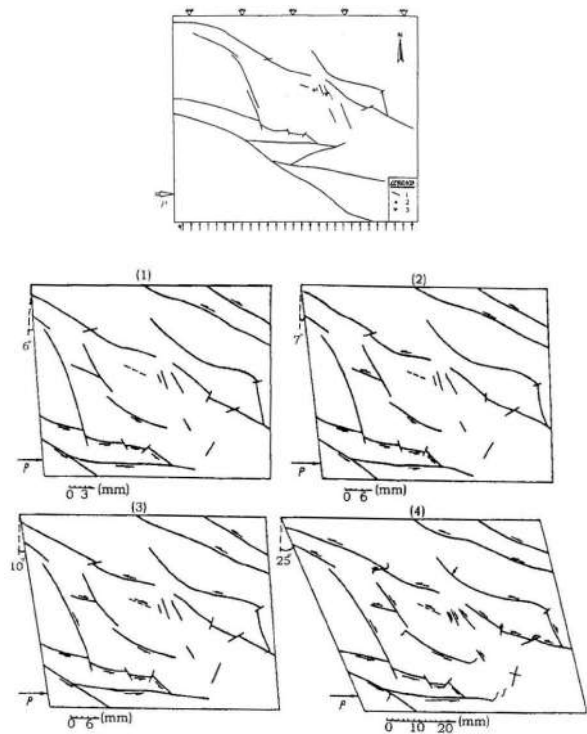
精品课程

研究案例：

龙羊峡电站区域稳定性模式机制

(1) 剪切位移首先始于南部断裂带。然后，依次传入北部断裂带及东部断裂带。当最后微量波及电站所在的东部构造带时，其它断裂带的位移已发展得十分强烈。

(2) 电站库坝区是一个相对的构造稳定区，外围深大断裂型活断层对该区的受力和变形，表现出明显的屏蔽和消能作用。



## 2.5 区域地应力场及岩体地应力研究

精品课程

### 2.5.3.3 应力场的数值模拟研究

采用二维或三维数值模拟软件(最常用的是有限元数值模拟软件), 进行应力场的数值模拟研究。

通常情况下, 数值模拟包括两个步骤:

首先是通过地质调查结果建立初步的、边界条件是定性的数值计算模型;

其次, 以实测地应力点为依据(如果有变形监测点, 也可将变形监测数据作为反演依据), 不断调整模型的边界条件和介质物理力学参数, 直至测点部位的计算应力量值和方向与实测值达到最大限度地拟合为止。此时可以认为, 数值模拟模型已基本实现了与实际的地质模型的“耦合”。用数值模拟模型计算出来的应力场也就基本代表实际地质模型的应力场。

## 2.5 区域地应力场及岩体地应力研究

精品课程

模拟研究工作**要点**:

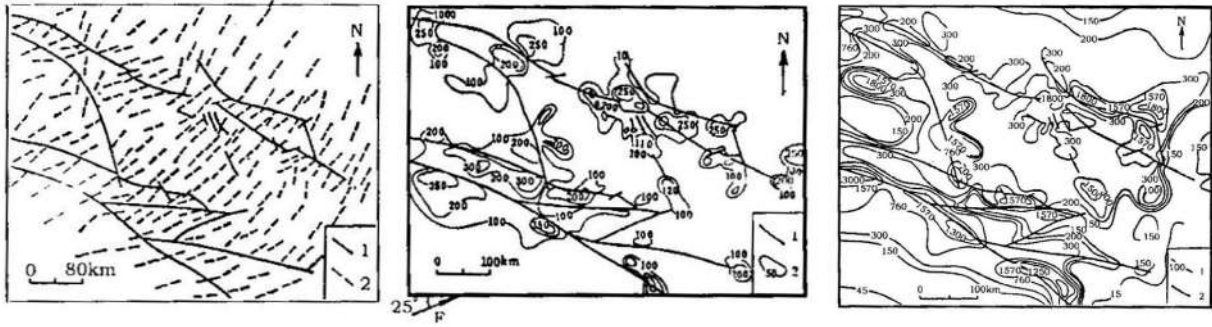
- (1) 根据现场调查结果确定的边界条件、力学参数和外力作用方式，建立有限元、离散元数值模型。
- (2) 模型作为理想的**弹塑性体平面应变**问题处理。  
断裂带视为理想的弹塑性层状材料，其余部分视为各向同性弹性体。  
根据实测资料、类比和反复计算，确定模型介质的力学参数。
- (3) 然后，通过不断改变外力大小并适当调整介质参数的反复计算，直到模型中实测点处的**计算值与实测值基本拟合**为止。所得的已经量化的应力-形变图像就是区域应力-形变场现今特征的真实写照。
- (4) 在此基础上，通过不断改变外力大小的计算，求得不同区段应力-形变强度间的定量关系。最后根据这样确定出的条件、参数及内部应力-形变的特点，建立最终的**量化模式**，作为定性、定量评价区内不同地段构造稳定性的基础。

## 2.5 区域地应力场及岩体地应力研究

精品课程

研究案例：

黄河龙羊峡电站区域应力-形变场现今特征的线弹性有限元分析



最大主应力  $\sigma_1$

最大剪应力  $\tau$  等值线

应变能密度等值线

## 2.5 区域地应力场及岩体地应力研究

精品课程

研究案例：

云南丽江地区区域地应力场数值模拟

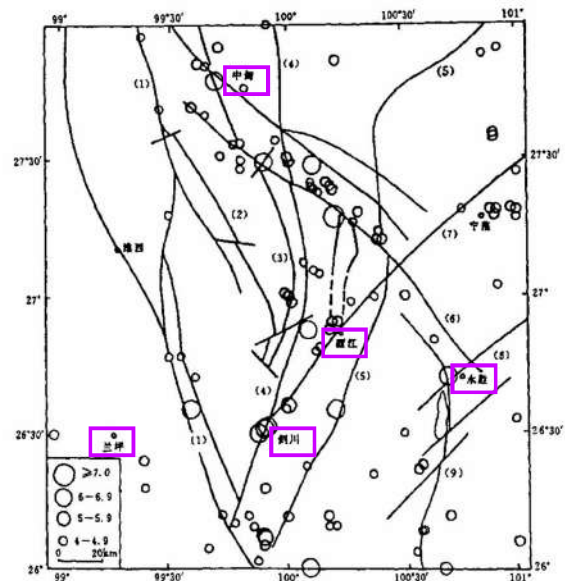


图 3-22 区域强震震中分布图 ( $M_s \geq 4.0$ )

(1) 金沙江-红河断裂; (2) 金江断裂; (3) 中甸断裂; (4) 楚波-白汉场断裂; (5) 三江口-鹤庆断裂; (6) 中甸-永胜断裂; (7) 丽江-小金河断裂; (8) 程海-金菁断裂

## 2.5 区域地应力场及岩体地应力研究

精品课程

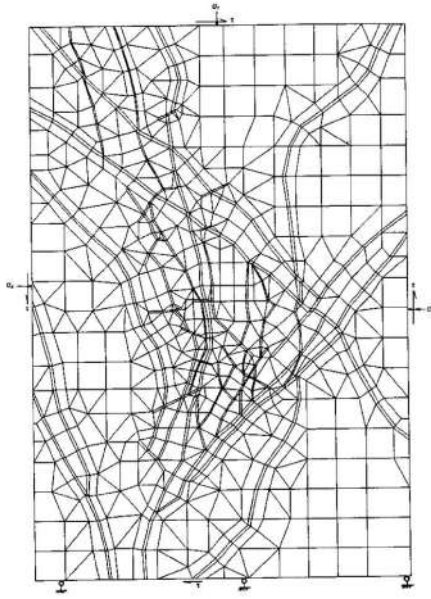


图 3-45 有限元计算模型及边界条件

表 3-24 介质力学参数表

介质类型	$E_1$ (MPa)	$\mu$	$C$ (MPa)	$\varphi$	$c'$	$\varphi'$	$E_2$ (MPa)	$\eta_1$ 与 $\eta_2$ (MPa/a)	
断裂带	A	19000	0.26	1.0	25	0.4	24	20000	$4 \times 10^6$
	B	20000	0.25	1.5	28	0.4	26	22000	$4.8 \times 10^6$
	C	22000	0.25	2.0	30	0.4	28	24000	$6 \times 10^6$
	D	24000	0.25	2.5	33	0.4	30	28000	$8 \times 10^6$
	E	26000	0.25	3.0	34	0.4	30	30000	$1 \times 10^7$
完整岩体	F (变质岩, 软)	36000	0.23	4.0	35	2.0	30	42000	$2 \times 10^8$
	G (变质岩, 硬)	39000	0.23	5.0	35	2.0	30	44000	$3 \times 10^8$
	H (沉积岩, 软)	41000	0.23	6.0	40	2.0	30	46000	$6 \times 10^8$
	I (沉积岩, 硬)	43000	0.22	8.0	40	2.0	30	48000	$6.6 \times 10^8$
	J (岩浆岩)	45000	0.21	9.0	45	2.0	30	50000	$8 \times 10^8$



## 2.5 区域地应力场及岩体地应力研究

精品课程



图 3-46 区域最大主应力作用方向的线性结果

表 3-25 最大主应力量值及作用方向与实测值的对比

位置	$\sigma_1$ 作用方向		$\sigma_1$ 量值 (MPa)	
	计算	实测	计算	实测
剑川	N16.7°W	N3°W	20.45	20.4
丽江	N12.6°W	N23°W	20.64	20.1

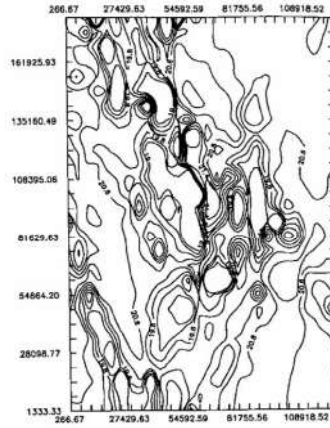


图 3-47 区域最大主应力 ( $\sigma_1$ ) 量值等值线图  
(线弹性计算结果)

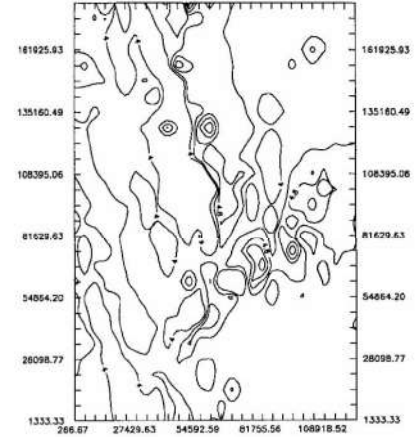


图 3-48 区域最大剪应力 ( $\tau$ ) 等值线图  
(线弹性计算结果)

# 思考题

精品课程

---

- 岩体天然应力状态的概念
- 我国地应力场的时空分布规律
- 地壳表层高地应力区及其地质地貌标志
- 岩体应力测量的主要方法