

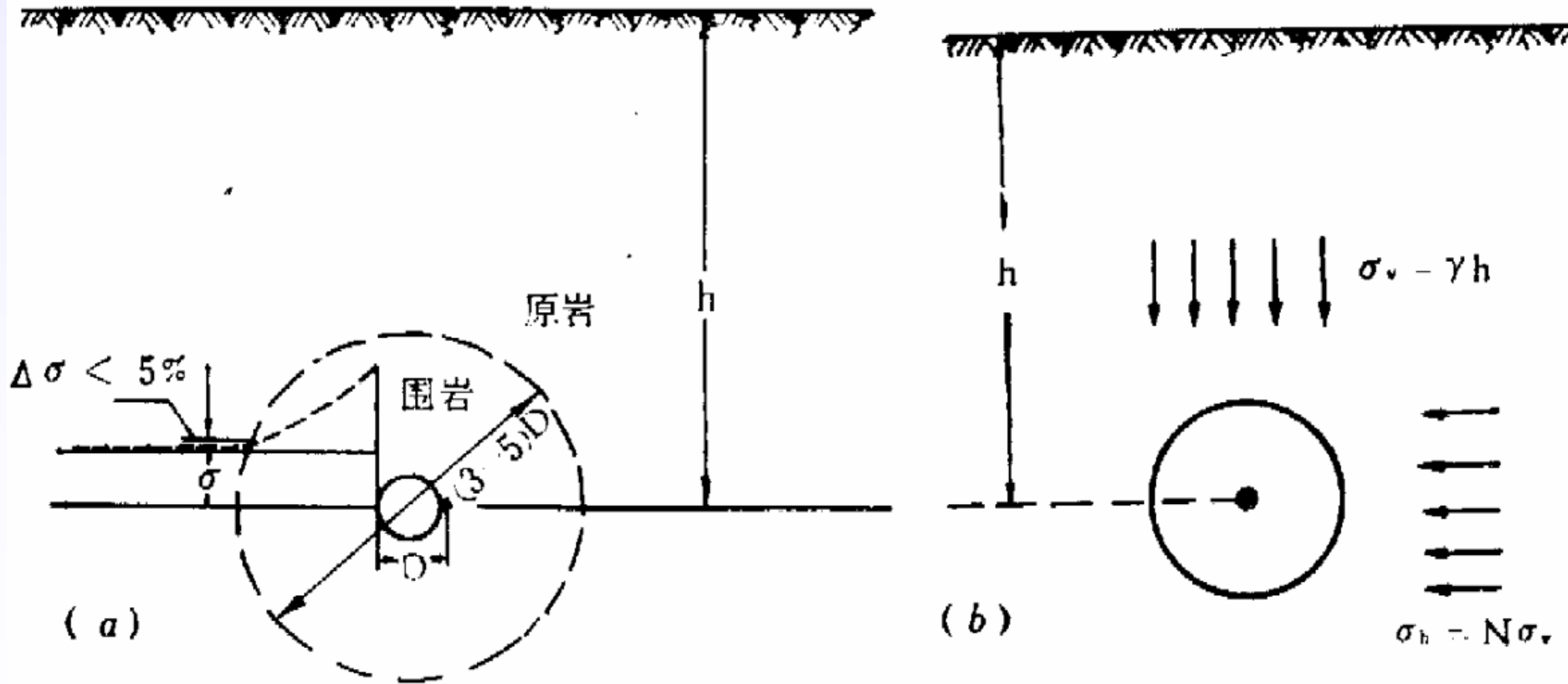
第9章 地下洞室围岩稳定性

地下洞室: 为各种目的修建在地层内的中空通道或中空洞室统称为地下洞室, 包括矿山坑道、铁路隧道、水工隧洞、地下发电站厂房、地下铁道及地下停车场、地下储油库、地下弹道导弹发射井、以及地下飞机库等。

围岩: 由开挖洞室引起的应力状态的重大变化局限在洞周一定范围之内。通常此范围等于地下洞室横剖面中最大尺寸的3—5倍, 习惯上将此范围内的岩体称为“围岩”

9.1 洞室围岩应力重分布特征

围岩应力重分布的一般特点



围岩及围岩内的初始应力场

$$\sigma_v = \sigma_{v0} + \gamma H$$

$$\sigma_h = N\sigma_v$$

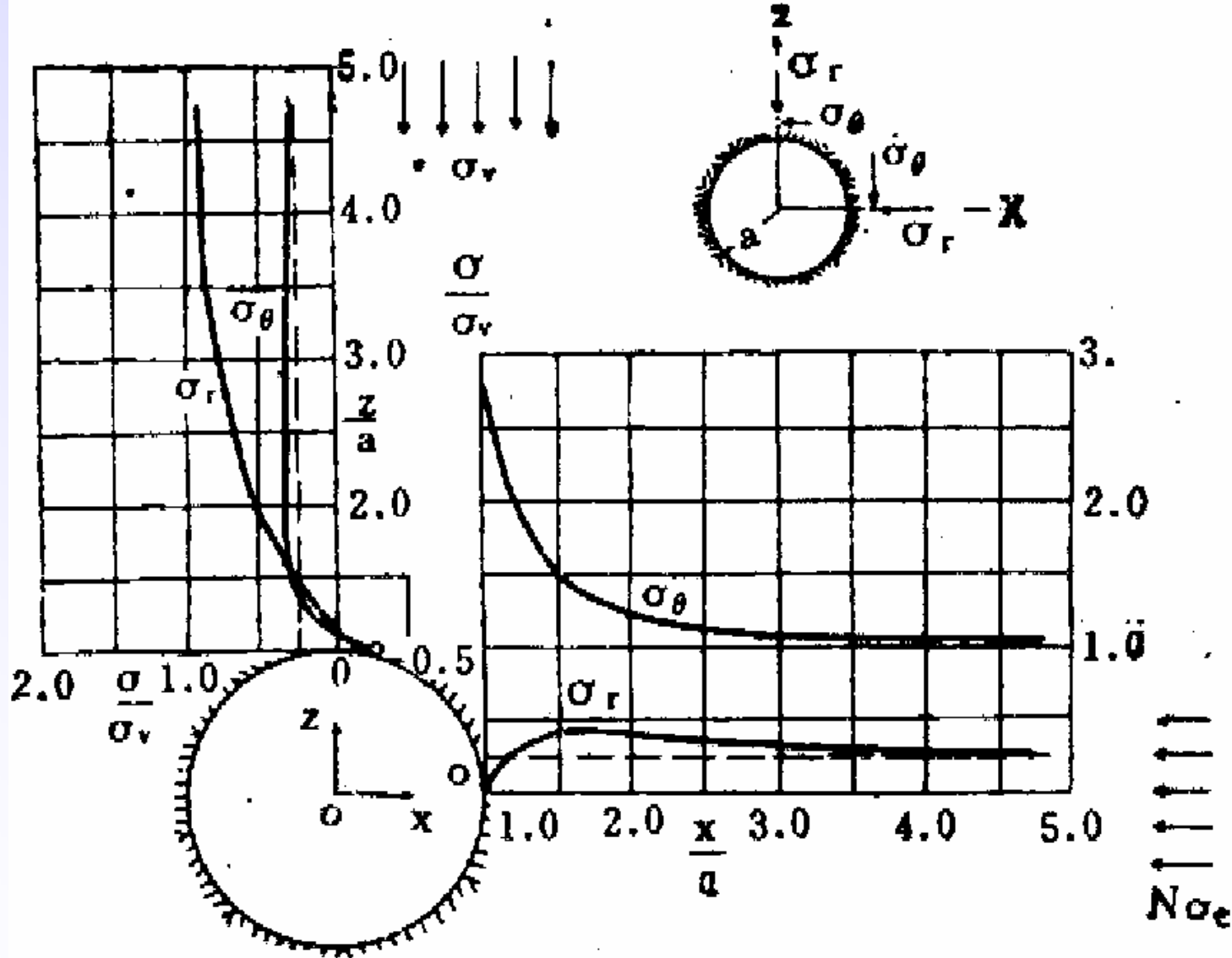


图9-2 $N=0.25$ 时，圆形隧洞周边的应力分布

理论与实验表明：地下洞室围岩应力重分布的特点主要取决于洞形(横断面形状)和岩体的初始应力状态。

9.2 洞室围岩的变形破坏方式

9.2.1 围岩变形破坏的一般过程和特点

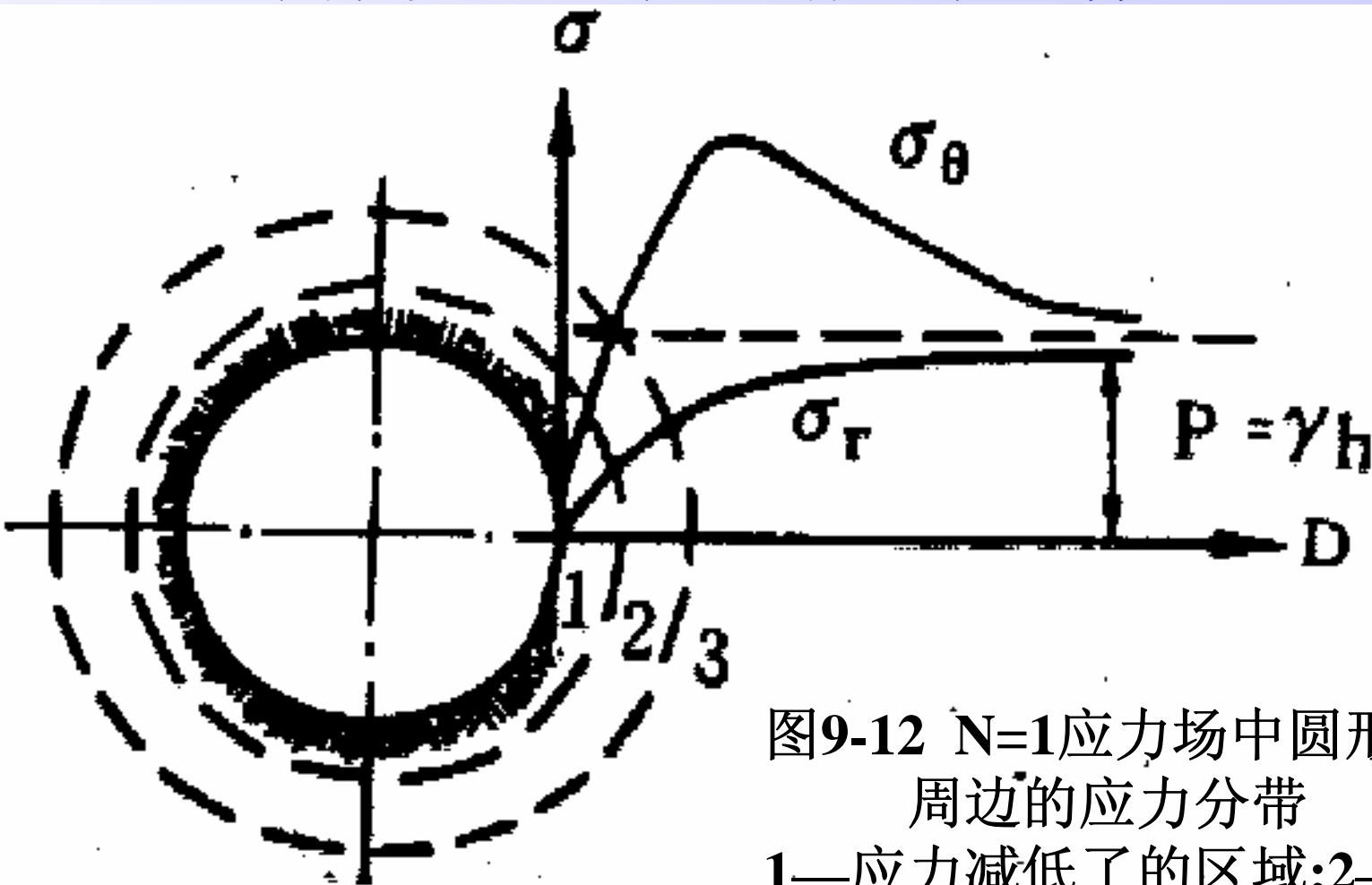


图9-12 N=1应力场中圆形隧洞
周边的应力分带

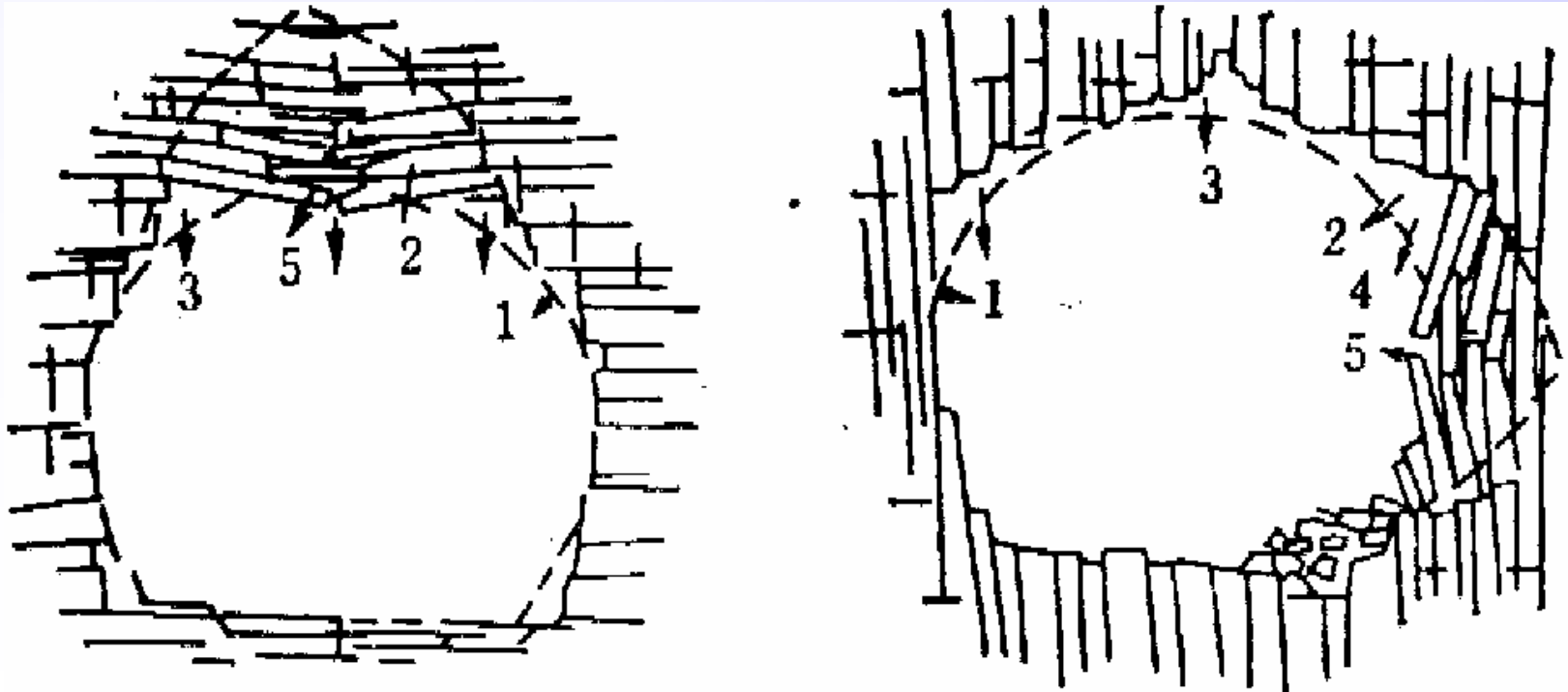
1—应力减低了区域;2—应力增高的区域;3—初始应力未受影响的区域

9.2.2 脆性围岩的变形破坏方式

主要类型：弯折内鼓、张裂塌落、劈裂剥落、剪切滑移、岩爆等

1. 弯折内鼓

是层状、特别是薄层状围岩变形破坏的主要形式。有两种情况，一是卸荷回弹的结果，二是应力集中使洞壁处的切向压应力超过薄层状岩层的抗弯折强度所造成的。

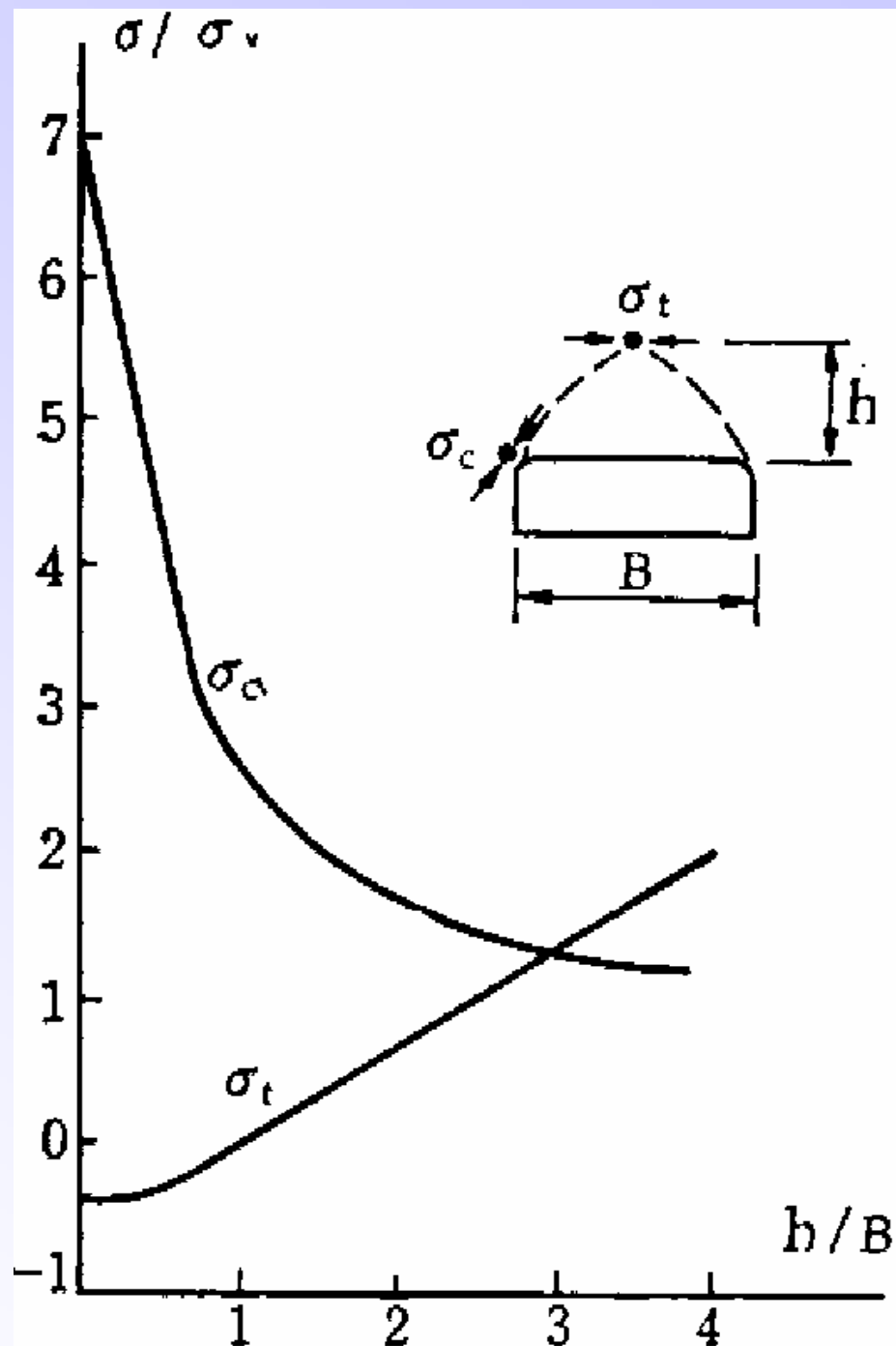


2. 张裂塌落

通常发生于厚层状或块体状岩体内的洞室顶拱。

当那里产生拉应力集中，且其值超过围岩的抗拉强度时，顶拱围岩就将发生张裂破坏。

图9-15 N=1/3的应力场中宽度比为6的坑道顶拱的冒落对顶拱应力的影响



3. 劈裂剥落、剪切滑移及碎裂松动

(1) 劈裂剥落

过大的切向压应力使围岩表部发生平行于洞室周期性的破裂。一些平行的破裂将围岩切割成厚度由几厘米到几十厘米的薄板，它们沿壁面剥落。

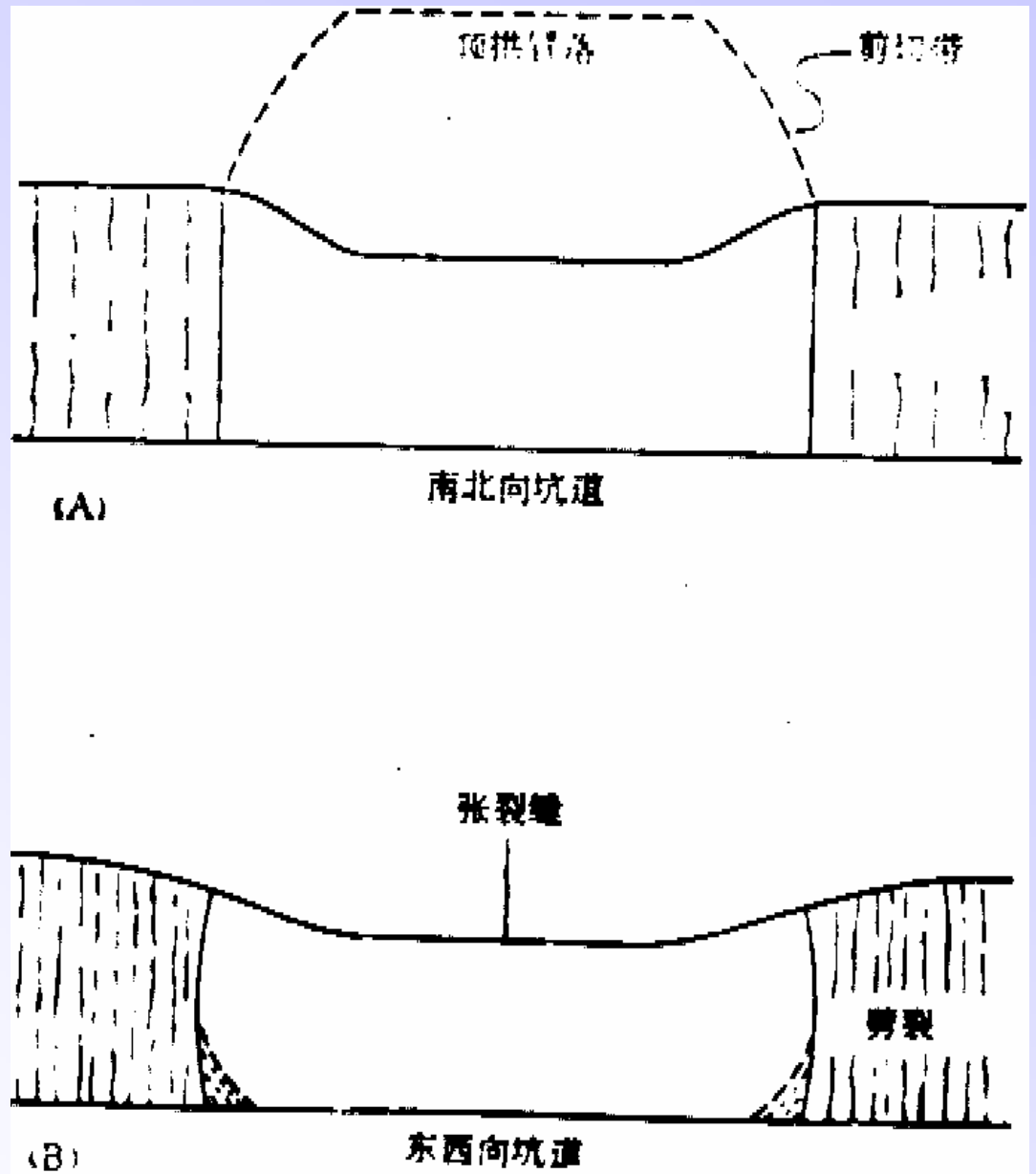


图9-16 美国弗吉尼亚洲皮特斯波夫煤层中不同走向坑道围岩的变形破坏特征

(2) 剪切滑移

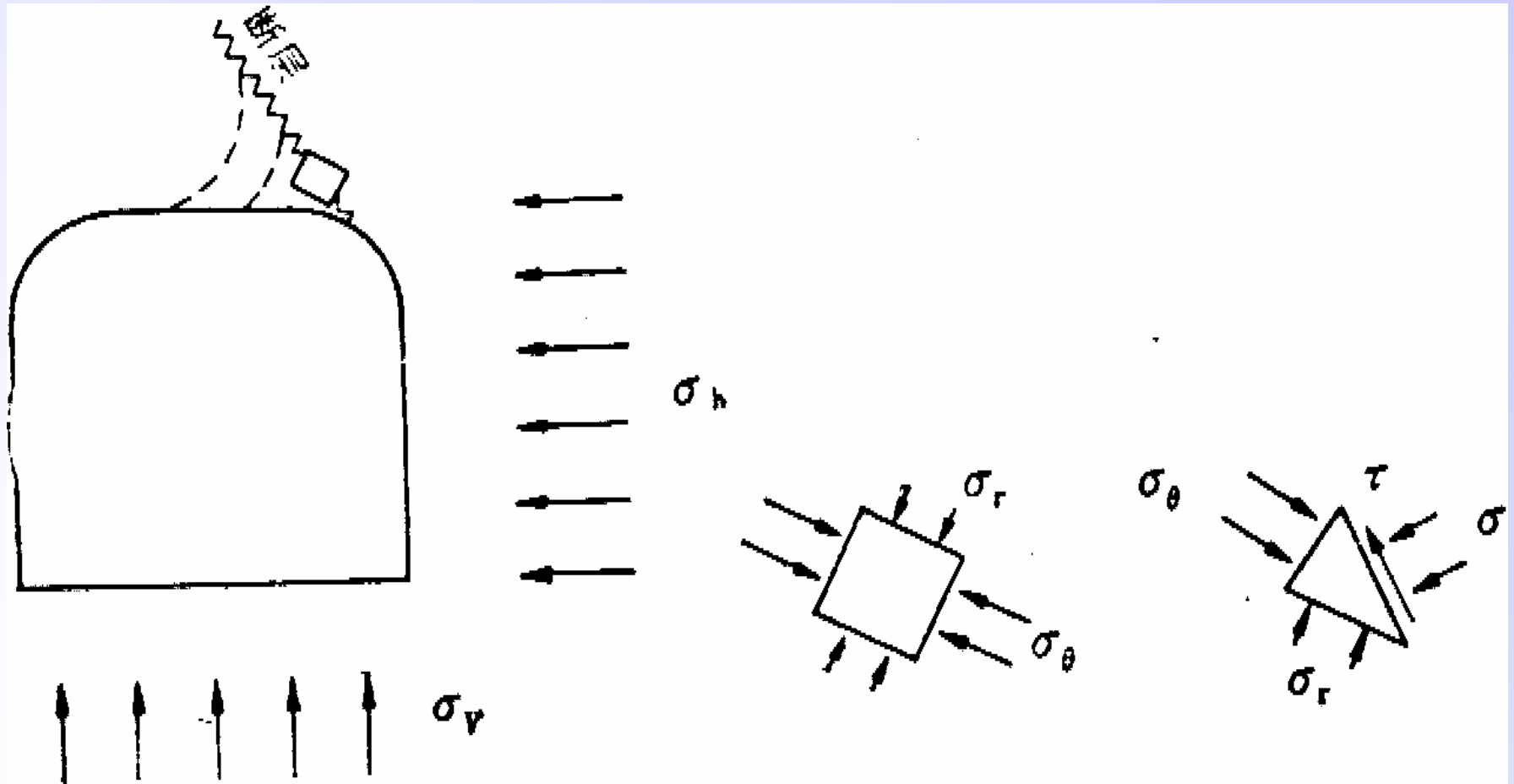


图9-17 滑移拉裂引起的顶拱冒落

(3) 碎裂松动

碎裂松动是碎裂结构岩体变形、破坏的主要形式，洞体开挖后，如果围岩应力已超过了围岩的屈服强度，这类围岩就会因沿多组已有断裂结构面发生剪切错动而松弛，并围绕洞体形成一定的碎裂松动带或松动圈。

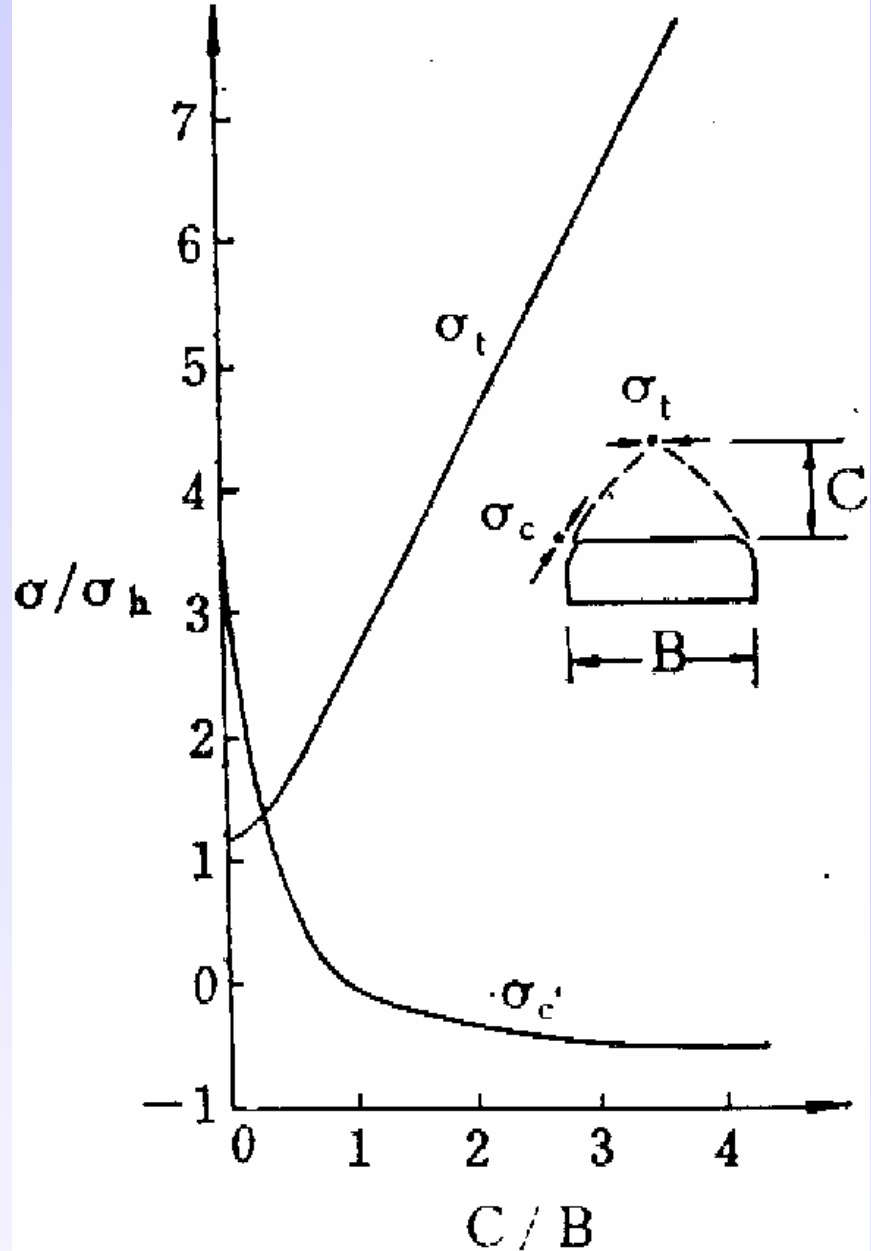


图9-18 宽高比为6应力比值系数 $N=3$ ，坑道顶拱塌落对顶拱应力的影响

4. 岩爆

(1) 岩爆的基本概念

岩爆:在地下开挖或开采过程中,围岩的破坏有时会突然地以爆炸的形式表现出来这就是所谓的岩爆。

(2) 岩爆的产生条件与发生机制

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \sigma a^2 \cdot \frac{\sigma l}{E} = \frac{\sigma^2 \cdot V}{2E}$$

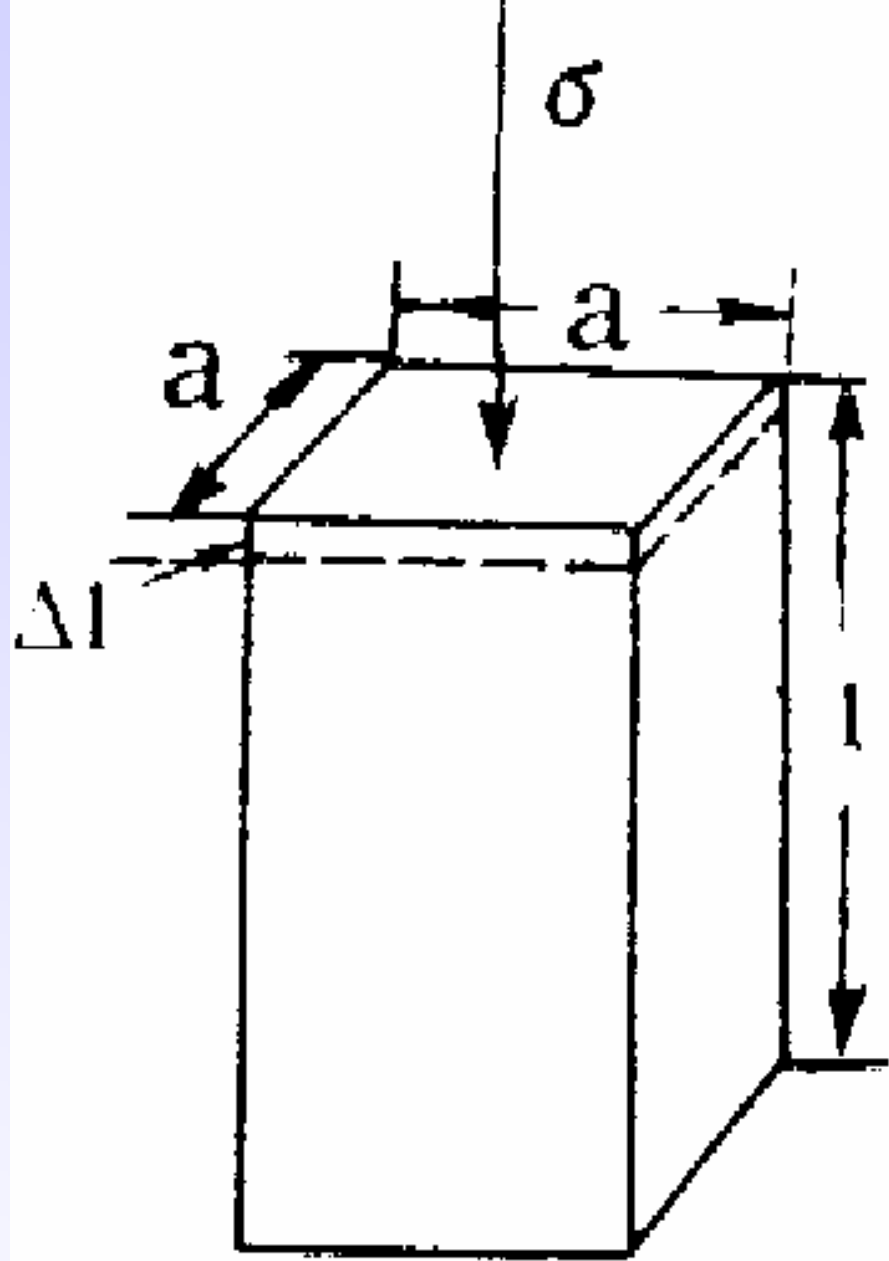


图9-19 方柱形岩体手力变形及应变能的储积

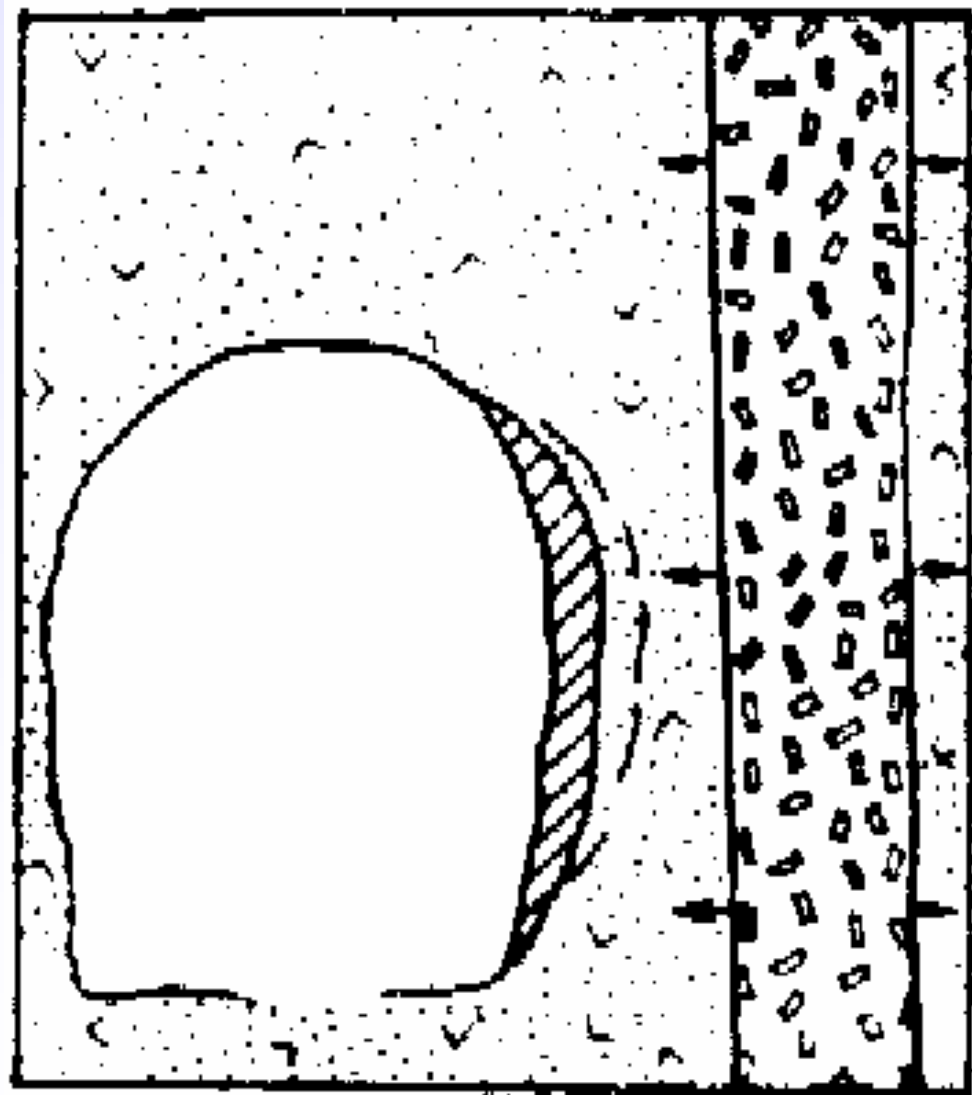


图9-20 易于产生岩爆的高变异应力区

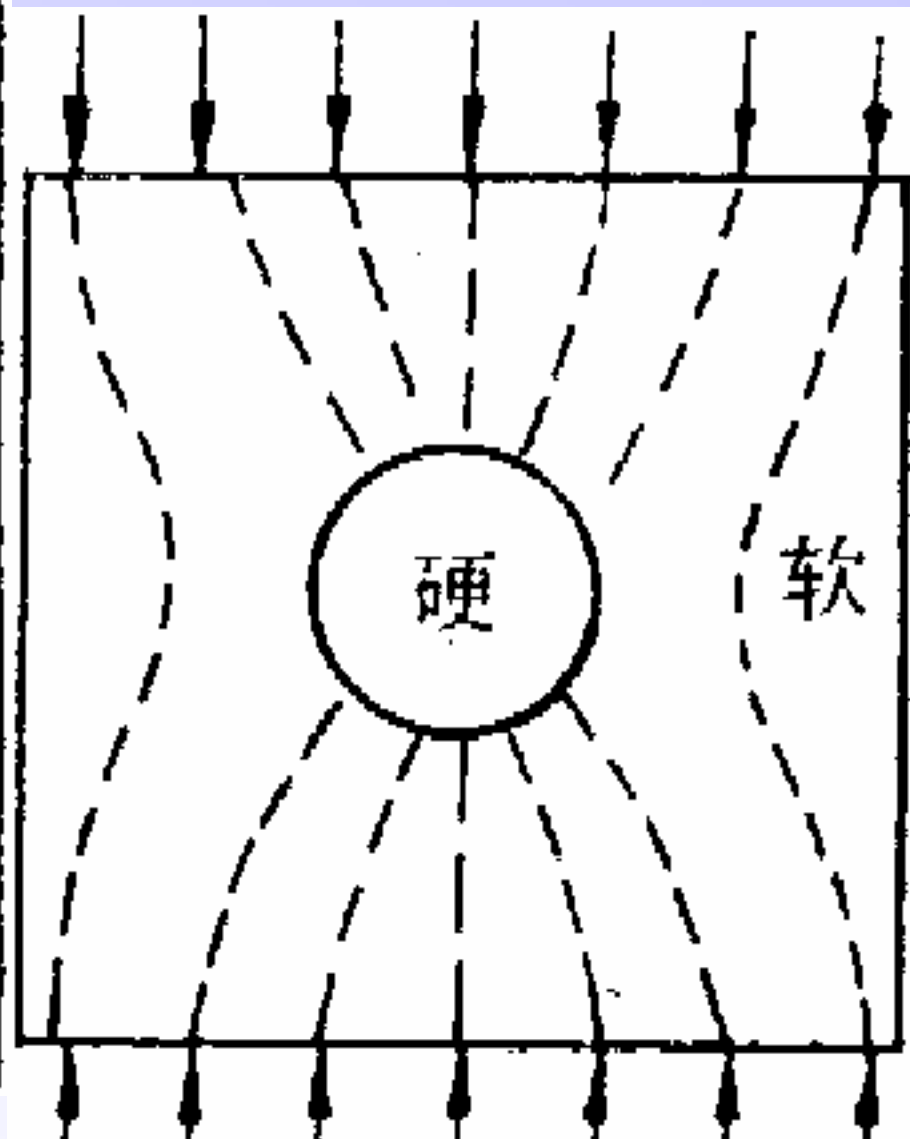


图9-21 由岩性条件所决定的局部应力集中区

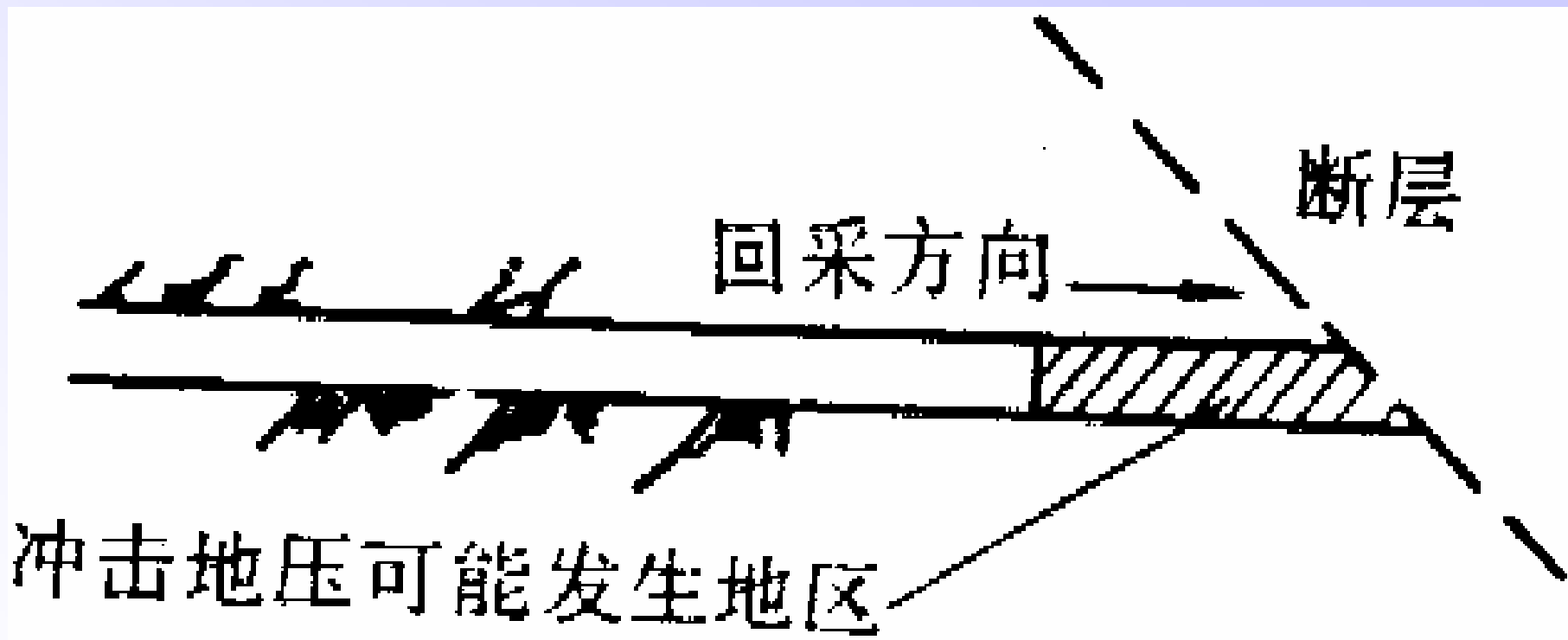


图9-22 开挖逼近断层时易于产生岩爆的部位

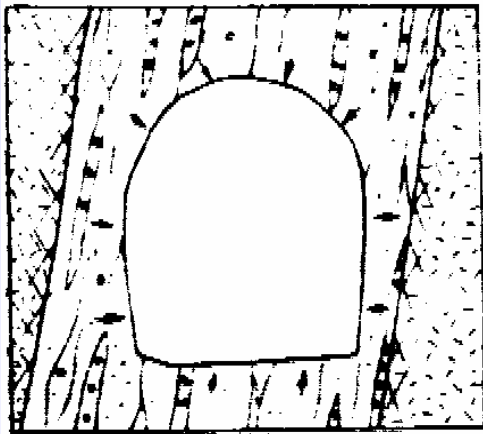
9.2.3 塑性围岩的变形与破坏

塑性围岩:包括各种软弱的层状结构岩体(如页岩、泥岩和粘土岩等)和散体结构岩体。

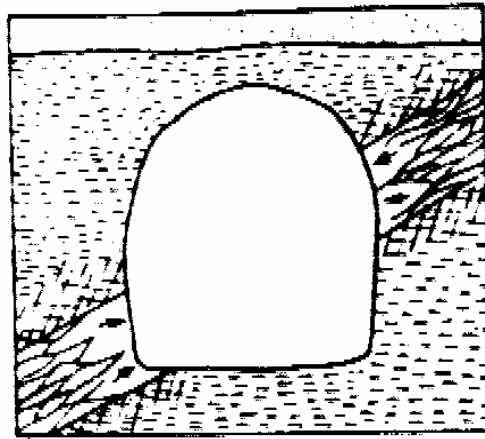
破坏方式: 塑性挤出、膨胀内鼓、塑流涌出、重力坍塌

- 1. 塑性挤出:** 洞室开挖后,当围岩应力超过塑性围岩的屈服强度时,软弱的塑性物质就会沿最大应力梯度方向向消除了阻力的自由空间挤出。
- 2. 膨胀内鼓:** 洞室开挖后,围岩表部减压区的形成往往促使水分由内部高应力区向围岩表部转移,结果常使其些易于吸水膨胀的岩层发生强烈的膨胀内鼓变形。
- 3. 塑流涌出:** 当开挖揭穿了饱水的断裂带内松散破碎物质时,这上结物质就会和水一起在压力下呈夹有大量碎屑物的泥浆状突然地涌入洞中。
- 4. 重力坍塌:** 破碎松散岩体在重力作用下发生的塌方。

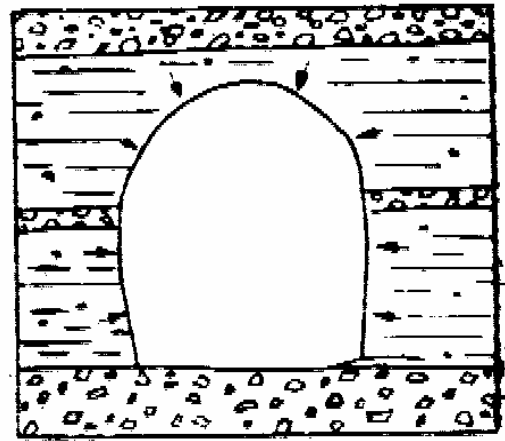
几种发生塑性挤出的地质条件



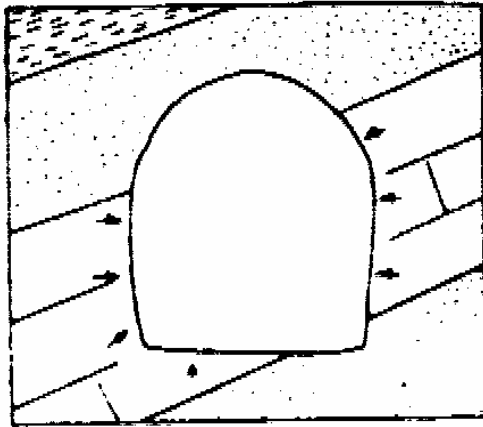
A



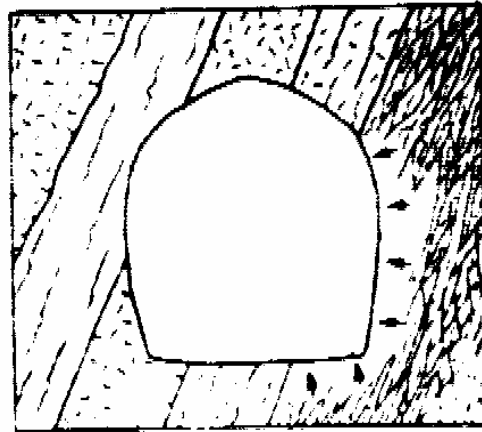
B



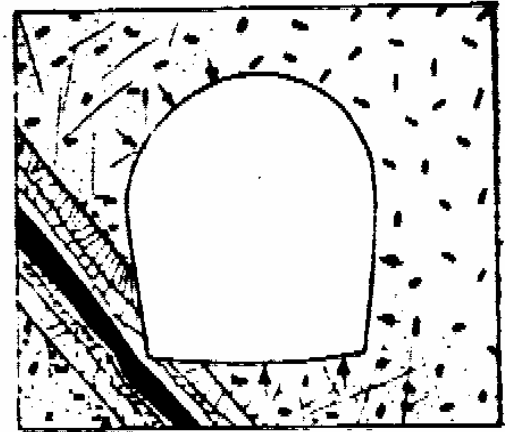
C



D



E



F

A—花岗岩的剪切破碎带； B—页岩中的缓倾角断裂带；
C—富含蒙脱石的风化火山灰； D—固结差的泥岩；
E—遭剪切破坏和风化的云母片岩；
F—与岩脉相接触的强蚀变细斑岩

9.2.4 采空区围岩变形、破坏引起的地表沉陷

1. 采空区矿柱系统的累进性破坏及采空区的冒落

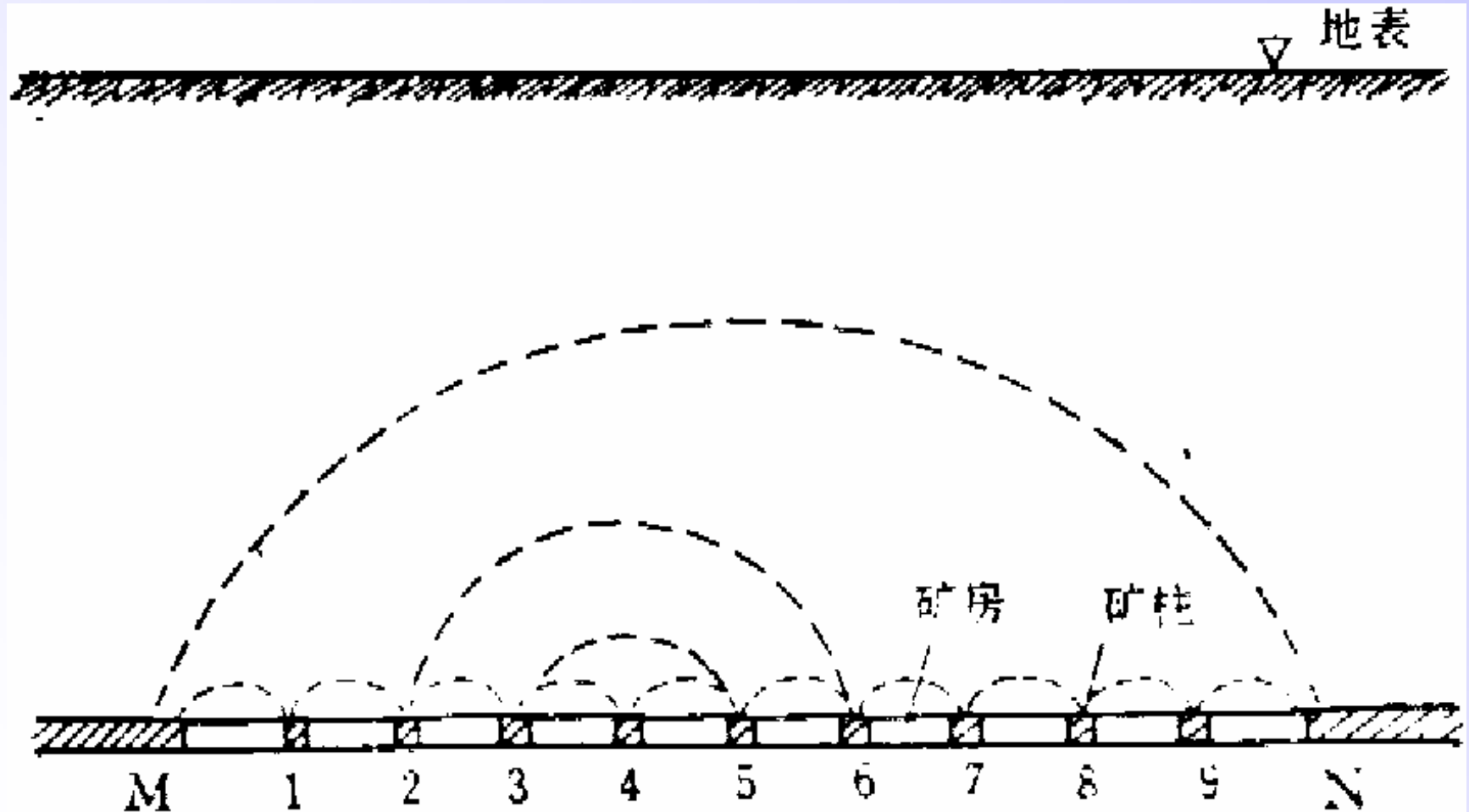


图9-24 采空区矿柱系统示意图

2. 地表沉陷与沉陷洼地的形成

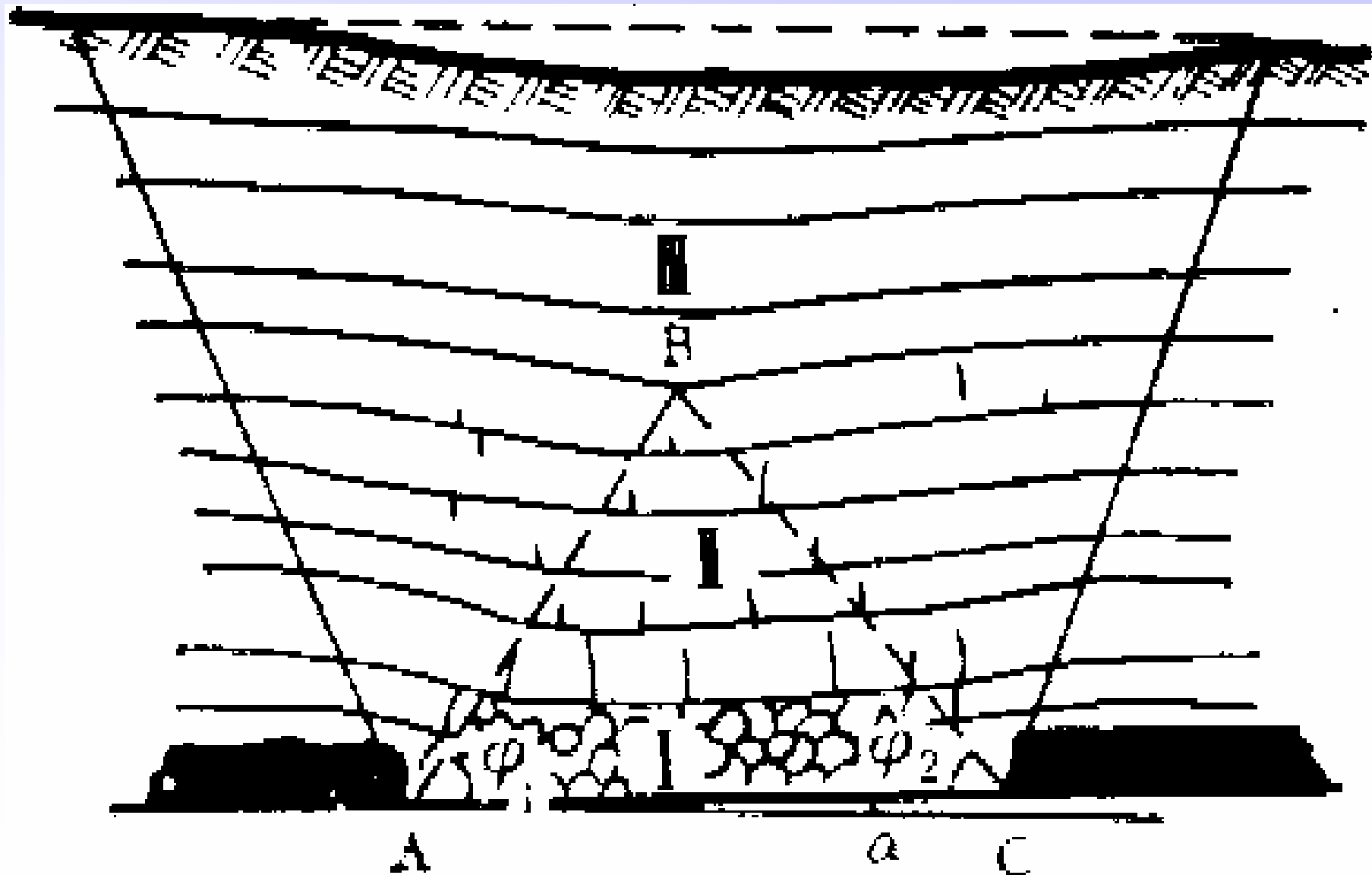


图9-25 采空区冒落引起的上复岩层的变形与错动的分带

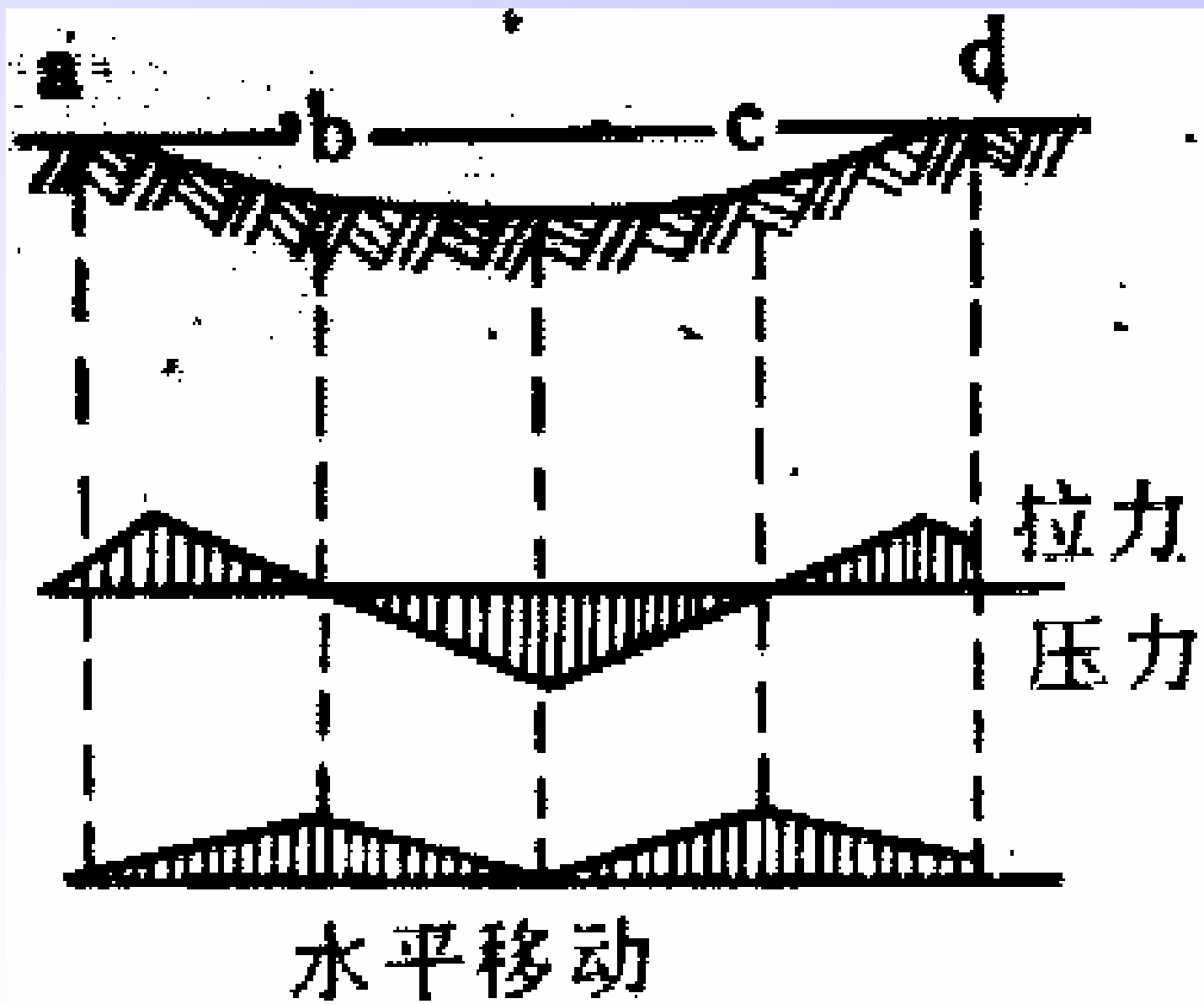


图9-26 下沉洼地内压，拉应力的分布

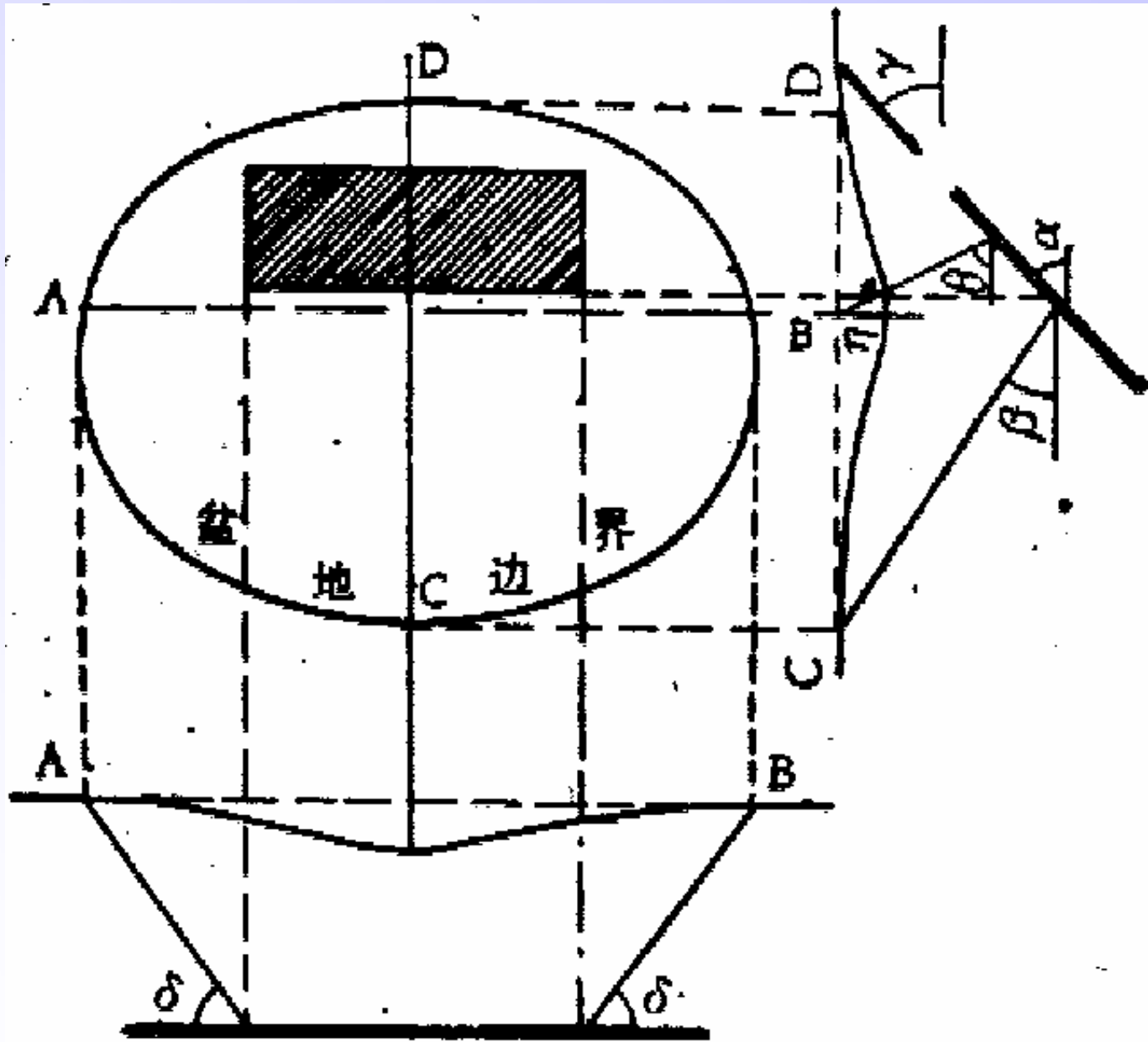


图9-27 倾斜岩层中下沉洼地的特征

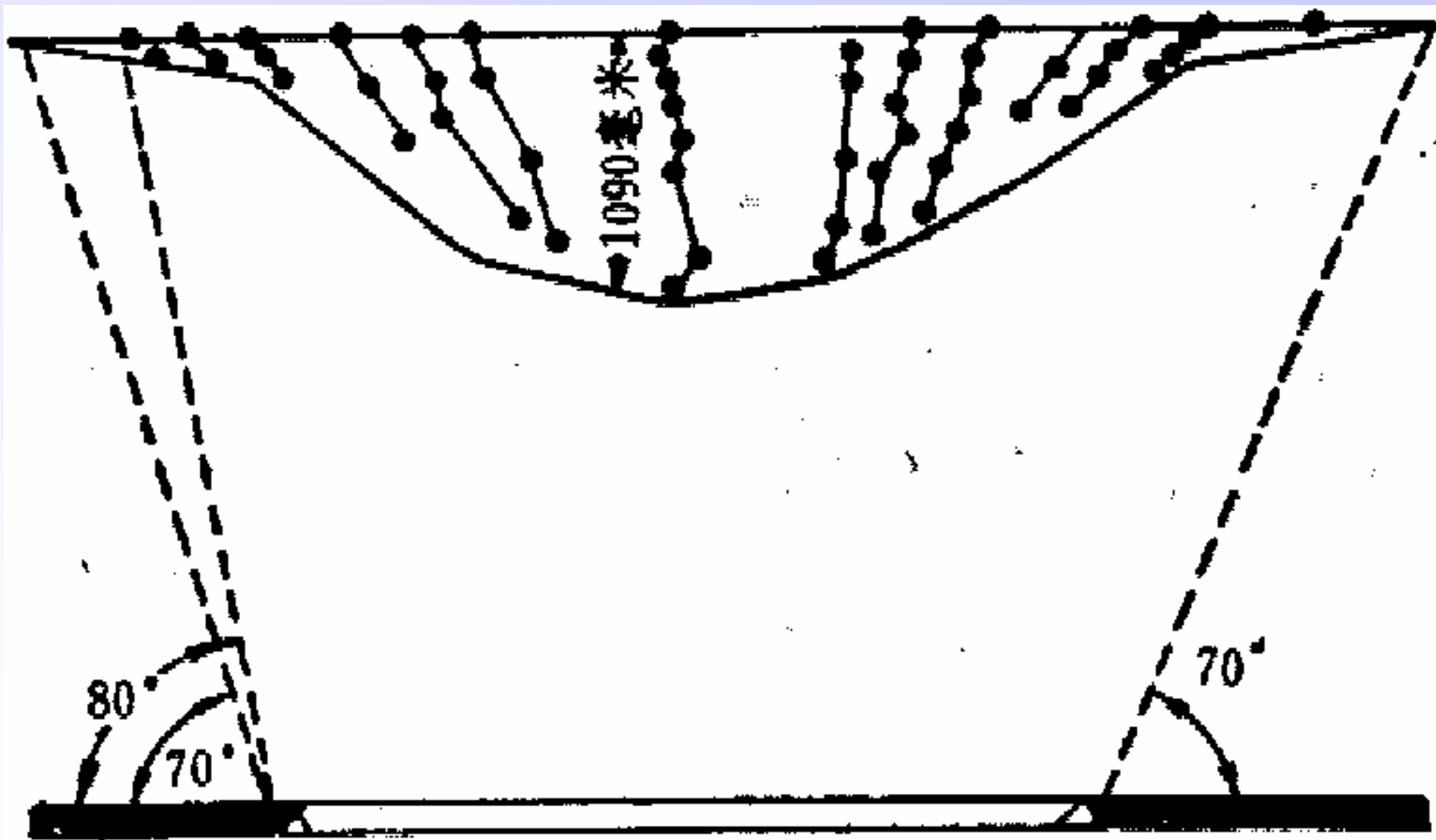


图9-28 与掘进掌子面平行剖面上下沉发展

9.3 洞室围岩稳定性评价

9.3.1 影响地下洞室围岩稳定性的因素分析

第一类因素是通过围岩应力状态而影响地下洞室围岩稳定性的，主要包括岩体的天然应力状态及洞室的剖面形状两者。

第二类因素包括围岩的岩性和结构，主要是通过围岩的强度来影响洞室围岩稳定性的。

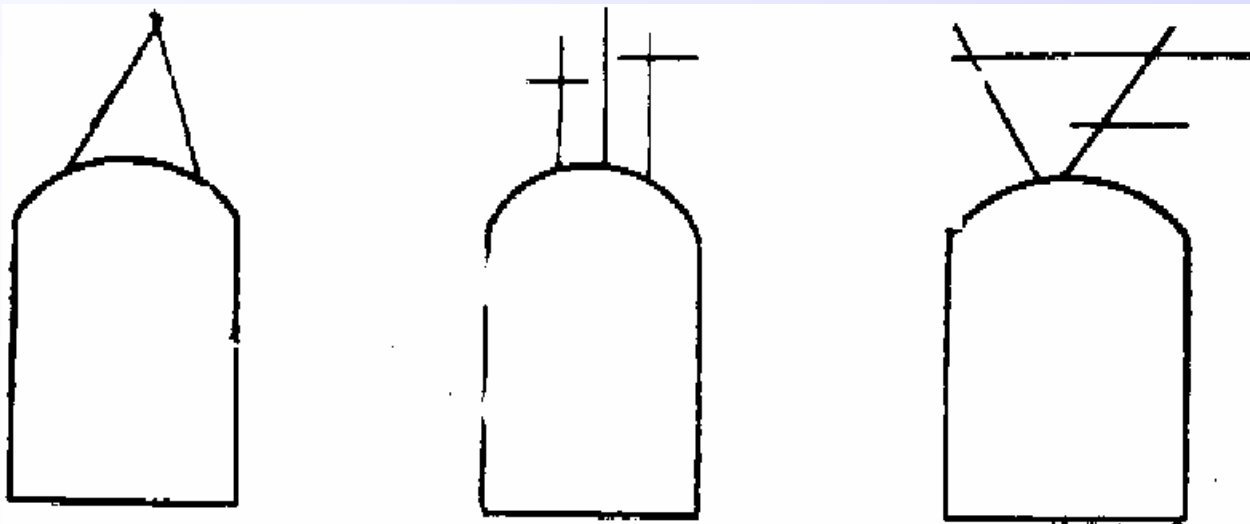


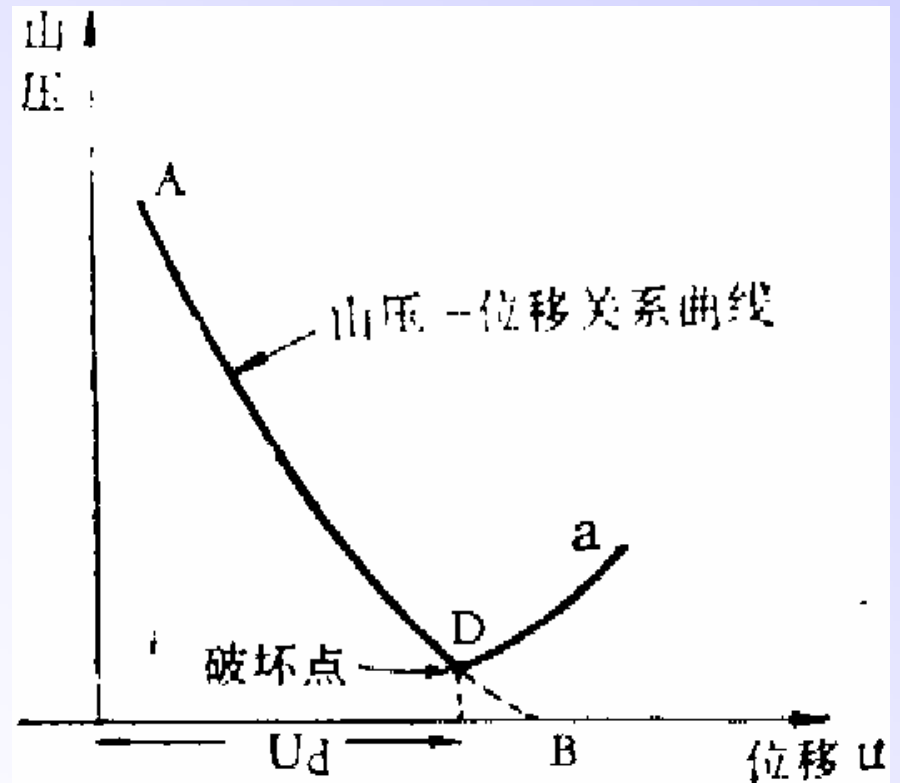
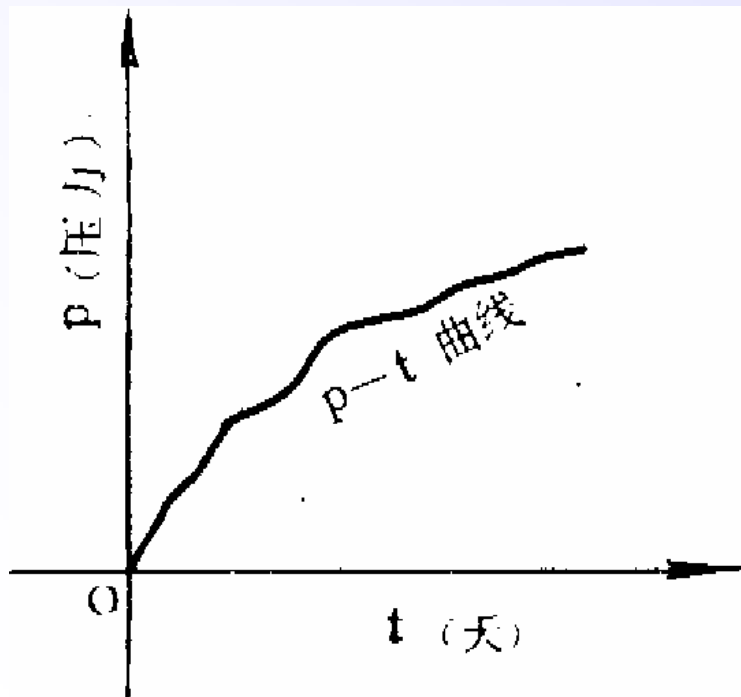
图9-31 地下洞室顶拱上的几种典型结构体

第三类是既能影响应力状态，又能影响围岩强度的因素。这主要是岩体中地下水的赋存、活动条件。

9.3.2 围岩压力问题

1. 围压的基本概念

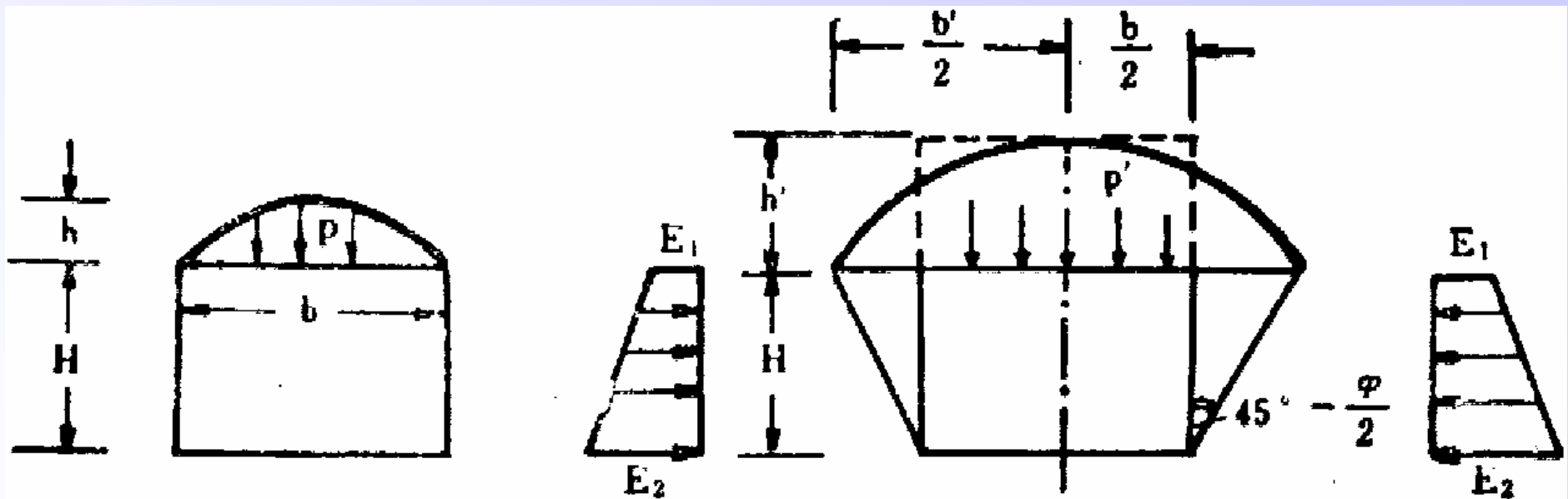
设计隧道或其它地下洞室时，如果工程地质分析与岩体力学计算的结果表明，开挖后围岩是不稳定的，那么就必须在设计相应的支衬结构以支承变形或塌落的围岩，保证洞体的稳定。为了达到这个目的，支衬结构就必须能够适应与围岩之间的相互作用，这种相互作用的力，对于支衬结构来说，就是所谓的围岩压力(或简称围压)。



2. 围压计算

(1) 松动围压

1) 用平衡拱理论确定围压



(a) 洞侧壁稳定;

(b) 洞侧壁不稳定;

图9-33 用平衡拱理论求围压图式

b 、 b' —平衡拱底宽； h 、 h' —平衡拱高； H —洞高； ϕ —岩石的内摩擦角；
 p 、 p' —分别为洞侧壁稳定和不稳定时的洞顶围压； E_1 、 E_2 —侧壁单位面积上的围压

计算公式为：

$$P = \frac{2}{3} \gamma b h$$

$$P' = \frac{2}{3} \gamma b' h'$$

$$h = \frac{b}{2 f_k}$$

$$h' = \frac{b}{2 f_k}$$

$$P = \frac{1}{3} \cdot \frac{b^2}{f_k} \cdot \gamma$$

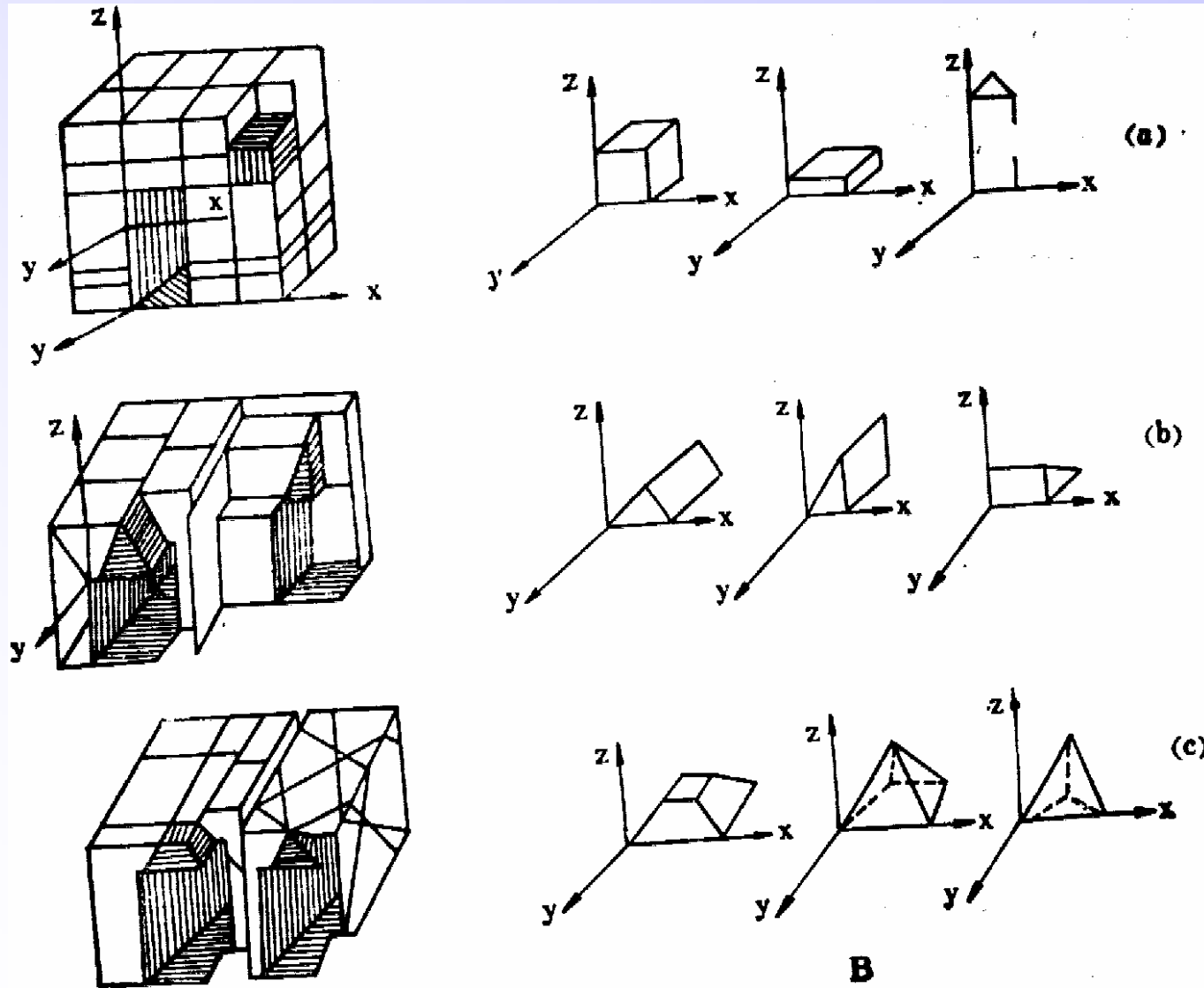
$$P' = \frac{1}{3} \cdot \frac{b'^2}{f_k} \cdot \gamma$$

f_k 为岩石的坚固性系数或称普氏系数

砂性土, $f_k = \text{tg}\phi$

粘性土 $f_k = \text{tg}\phi + c/\sigma$

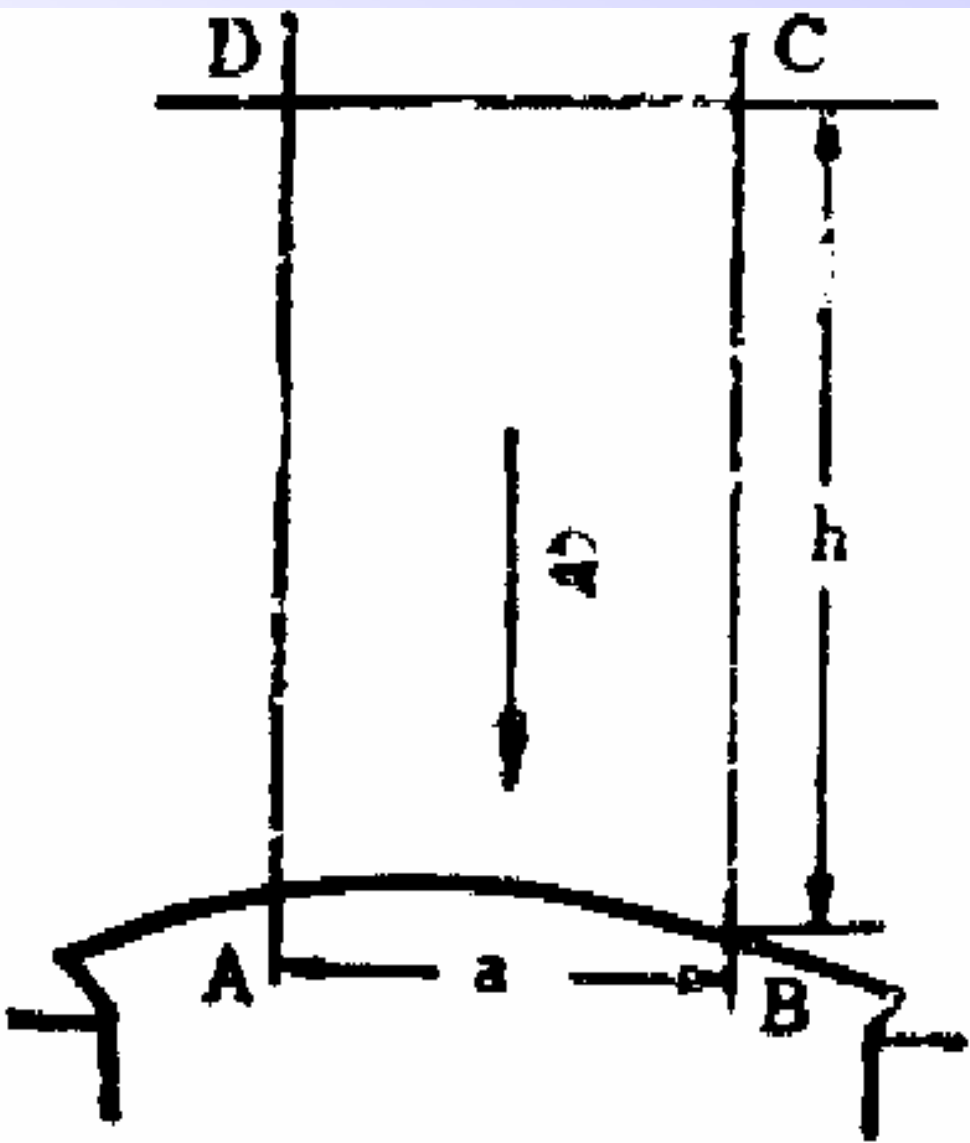
2) 用地质分析法确定围压



分离体类型图式

(a) 柱形分离体; (b) 楔形分离体; (c) 锥形分离体

A: 柱形分离体的围压计算



柱形分离体围压计算图式

$$P_0 = ah\gamma \quad (1)$$

$$P_0 = \frac{1}{3} \cdot \frac{a^2}{f_k} \cdot \gamma \quad (2)$$

$$f_k = \frac{1}{3} \frac{a}{h} \quad (3)$$

B: 尖角形分离体的围压计算

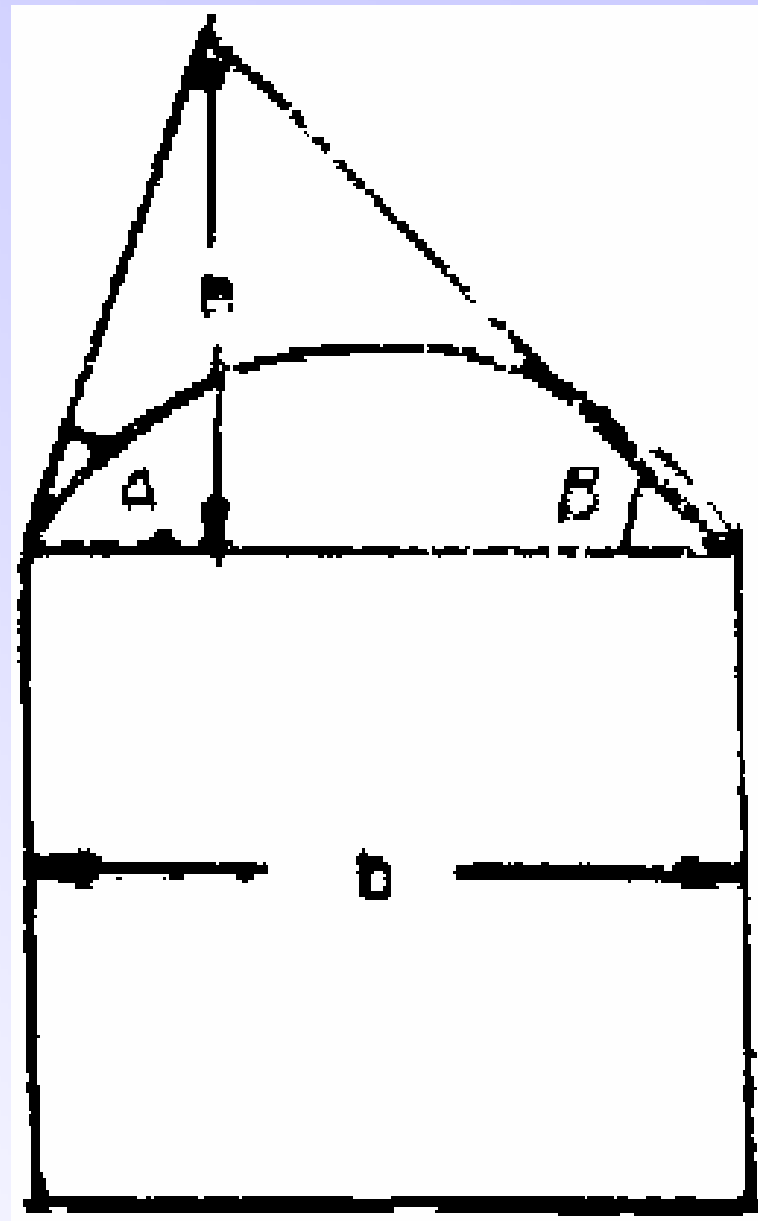
$$P_0 = \frac{1}{2} ah\gamma \quad (1)$$

$$h = a / (\text{ctg}\alpha + \text{ctg}\beta) \quad (2)$$

$$P_0 = \frac{1}{3} \cdot \frac{a^2}{f_k} \cdot \gamma \quad (3)$$

$$f_k = \frac{2}{3} \cdot \frac{a}{h} \quad (4)$$

$$f_k = \frac{1}{3} n \frac{a}{h} \quad (5)$$



尖角形分离体围压计算图式

(2) 塑性围压和膨胀围压

塑性围岩

$$\sigma_{\gamma} = (P + c \cdot ctg \varphi)(1 - \sin \varphi) \left(\frac{r}{R}\right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} - c \cdot ctg \varphi$$

$$R = \gamma \left\{ \frac{P + c \cdot ctg \varphi}{\sigma_{\gamma} + c \cdot ctg \varphi} (1 - \sin \varphi) \right\}^{\frac{1 - \sin \varphi}{2 \sin \varphi}}$$

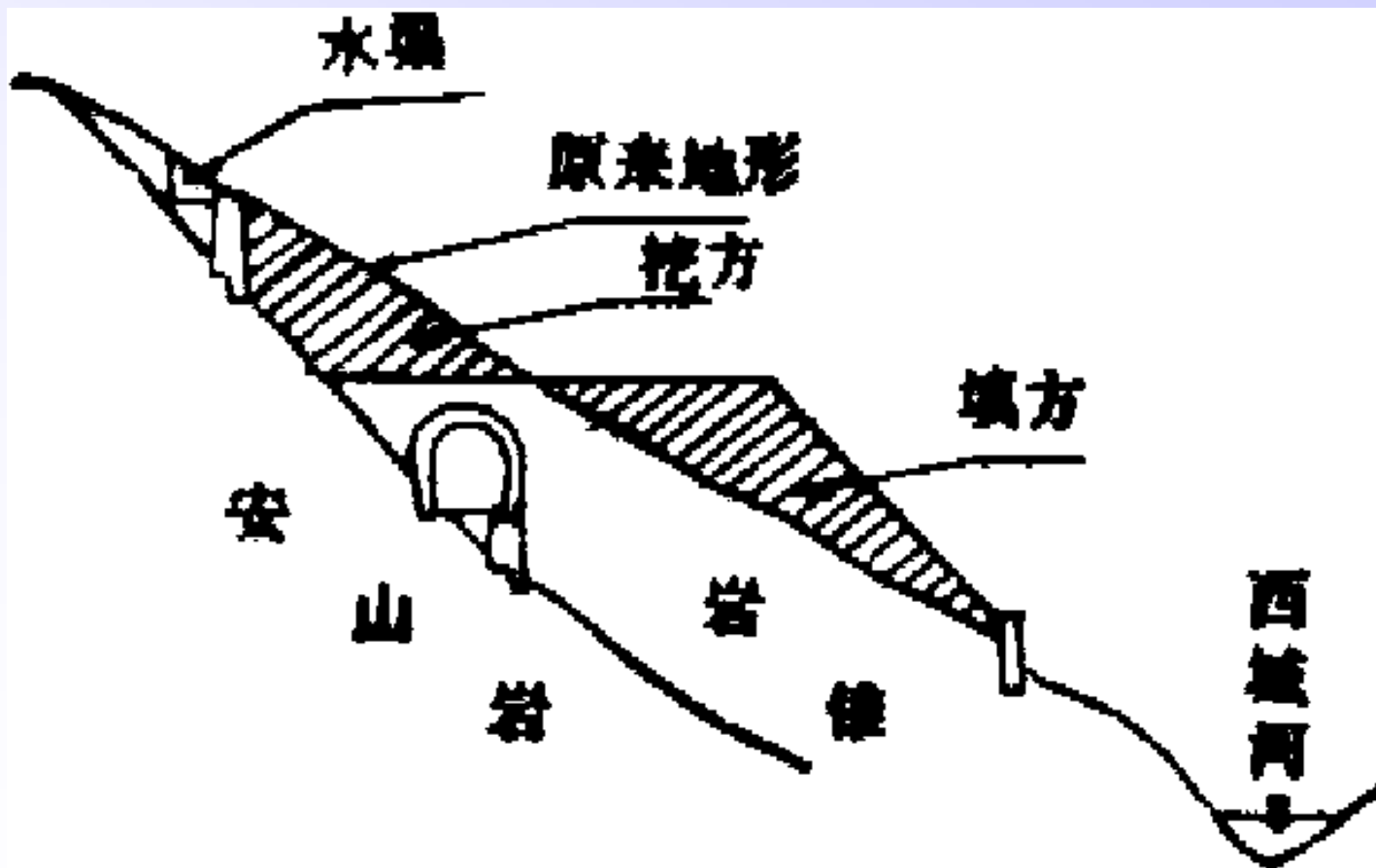
膨胀围压

(3) 流动围压

按静水压力的原则来计算和评价其大小

(4) 偏压

1) 傍山隧道



岩堆蠕变造成的偏压及其处理措施图

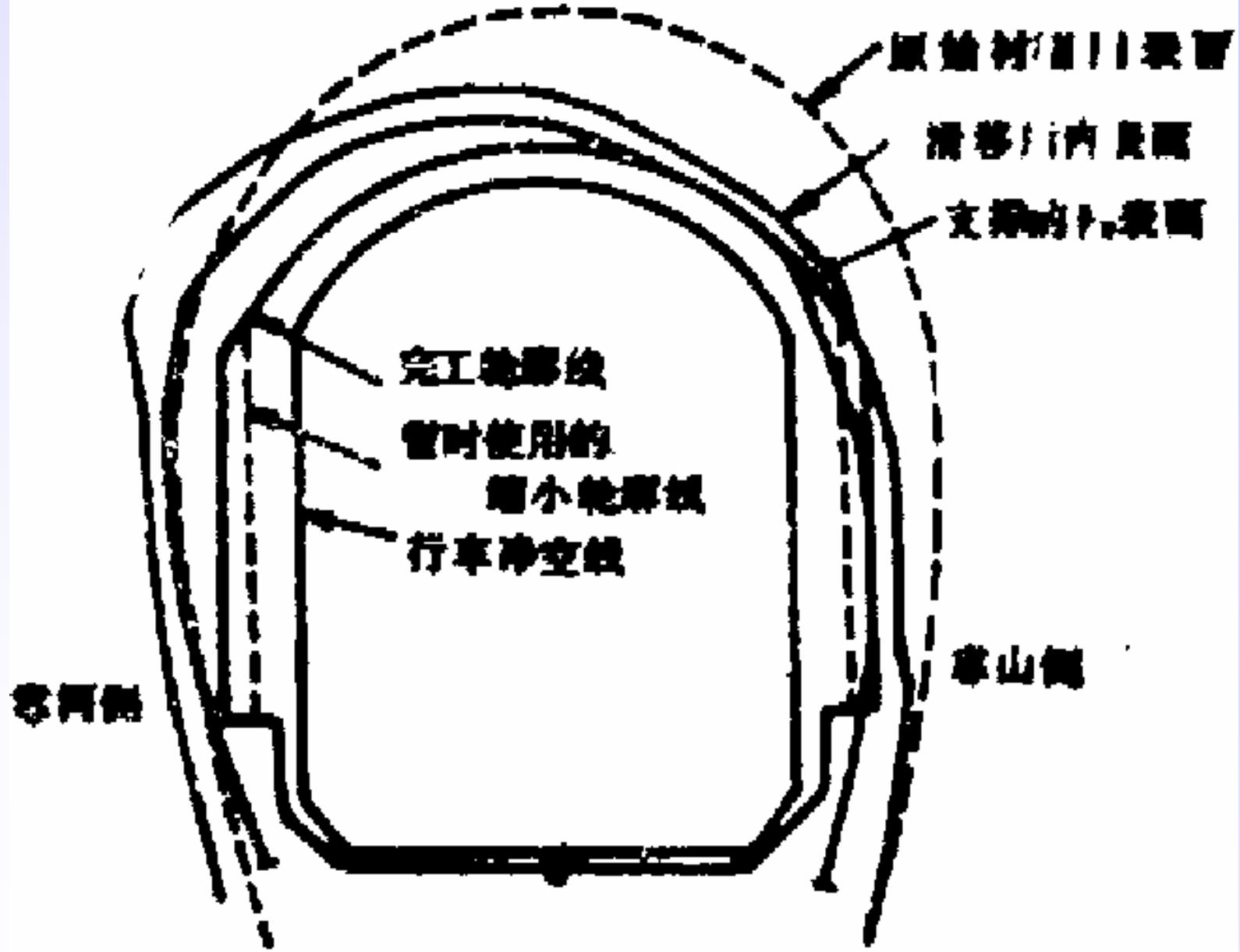
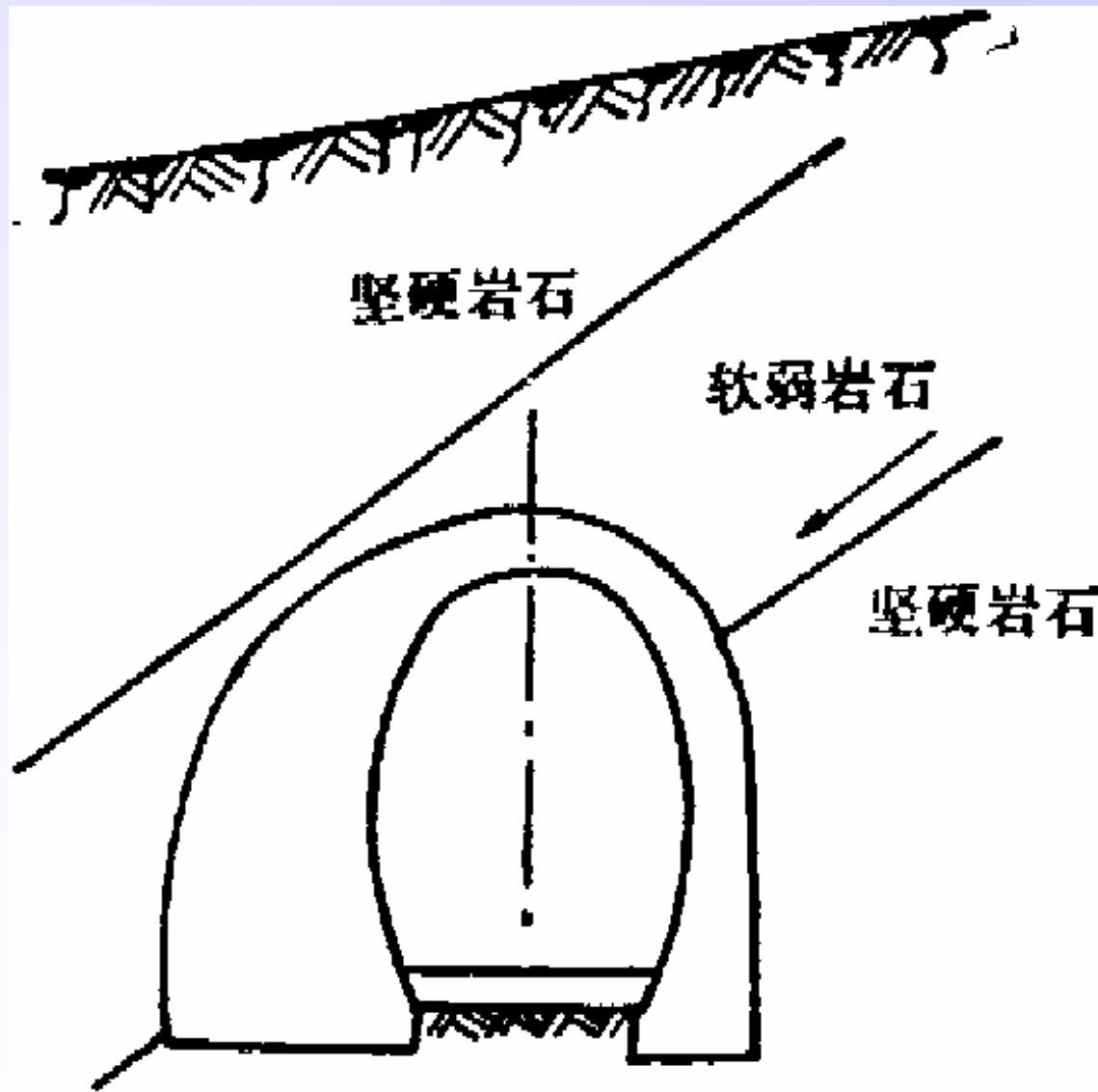


图9-38 高场山隧道衬砌变形情况

2) 岩体沿软弱断层(图9-39)或充填有易滑物质裂隙蠕滑也可对位于其下洞室造成偏压。



沿软弱岩层滑动造成的偏压

(5) 我国铁道部门隧道规范所建议的计算方法

围岩垂直均布压力按下式计算：

$$P=0.45 \cdot 2^S \cdot \gamma \cdot \omega$$

ω —宽度影响系数。 $\omega=1+i(B-5)$

- 1) $H/B < 1.7$ (H 为隧道的高度)；
- 2) 深埋隧道；
- 3) 不产生显著偏压及膨涨压力的一般围岩；
- 4) 采用一般隧道施工法的隧道；

围岩水平均布压力

围岩类别	I	II	III	IV	VI~V
水平均布压力	0	$(0 \sim 1/6)P$	$(1/6 \sim 1/3)P$	$(1/3 \sim 1/2)P$	$(1/2 \sim 1)P$

(6) 我国水电部门水工隧洞设计暂行规范所建议的方法

建议用下式计算山压：

$$P = S_y \cdot \gamma \cdot B \quad (1)$$

$$q = S_x \cdot \gamma \cdot H \quad (2)$$

岩石坚硬程度	代表的岩石名称	节理裂隙多少或风化程度	山压系数	
			S_y	S_x
坚硬岩石	石英岩、花岗岩、流纹斑岩、安山岩、玄武岩、厚层硅质灰岩等	节理裂隙少，新鲜节理裂隙不太发育，微风化节理裂隙发育，弱风化	0-0.05 0.05-1 0.1-0.2	— — —
中等坚硬岩石	砂岩、石灰岩、白云岩、砾岩等	节理裂隙少，新鲜节理裂隙不太发育，微风化节理裂隙发育，弱风化	0.05-0.1 0.1-0.2 0.2-0.3	— — 0-0.05
软弱岩石	砂页岩互层、粘土质岩、致密的泥灰岩等	节理裂隙少，新鲜节理裂隙不太发育，微风化节理裂隙发育，弱风化	0.1-0.2 0.2-0.3 0.3-0.5	— 0-0.05 0.05-0.1
松软岩石	严重风化及十分破碎的岩石、断层破碎带等		0.3-0.7 或更大	0.05-0.5 或更大

9.4 洞室围岩失稳的防治措施

常用的支衬结构有支撑、衬砌、锚杆支护以及“锚杆—喷射混凝土”联合支护等类型。

- (1) 支撑是临时性保护围岩的结构
- (2) 衬砌是一种永久性加固围岩的结构

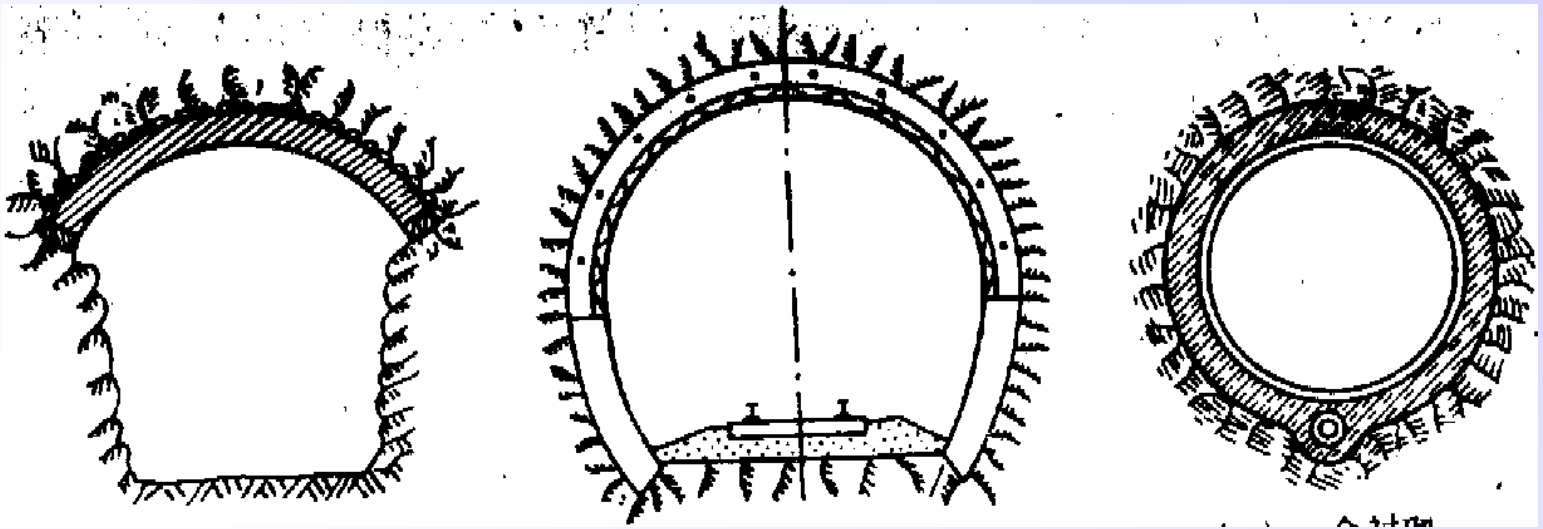
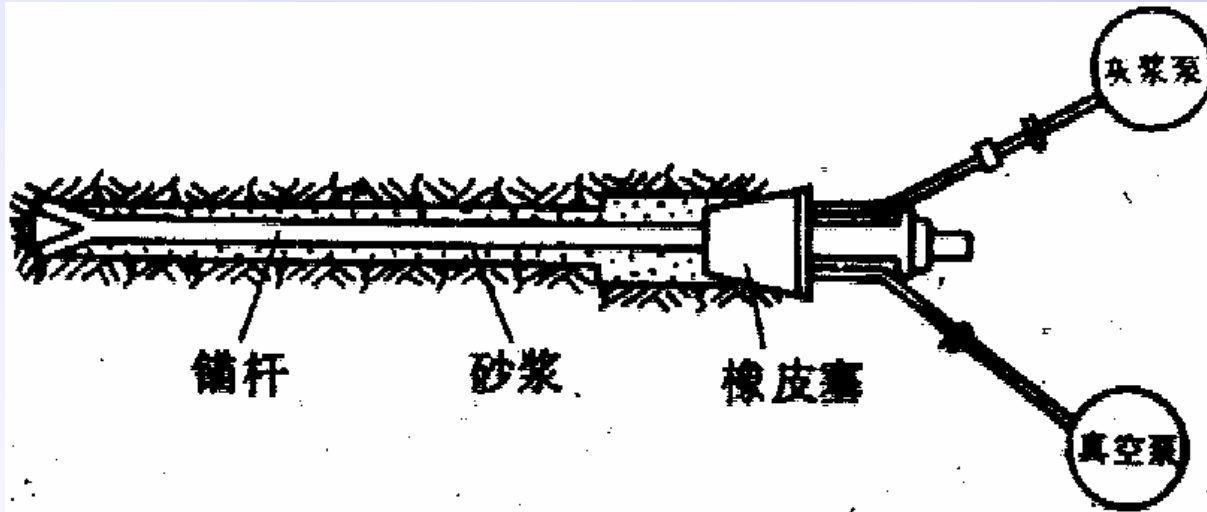


图9-42 砌衬的类型示意图

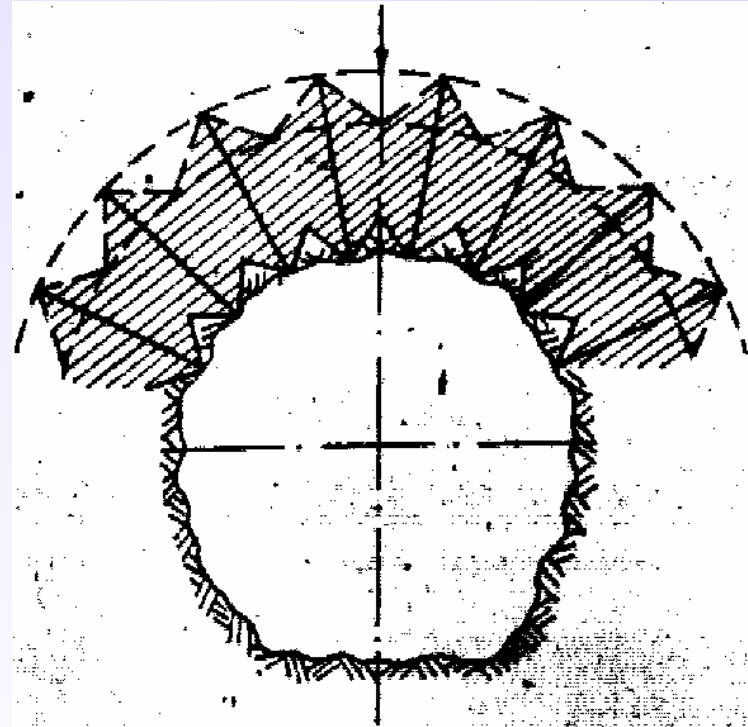
(a) 半衬砌；(b) 有边墙的衬砌；(c) 全衬砌。

(3) 锚杆支护是大量采用的一种提高围岩稳定性的措施



砂浆楔
头予应
力锚杆
的灌浆
工艺

预应力锚杆的加固作用



(4) “喷—锚”联合支护是近年来飞速发展的支护结构

喷锚支护结构示意图

