

# 第3篇 工程地质问题

第7章 区域稳定性

第8章 斜坡稳定性

第9章 地下洞室围岩稳定性

第10章 地基岩体稳定性

第11章 场地渗透稳定性

第12章 岩溶

第13章 泥石流

第14章 地应力

# 第7章 区域稳定性

## 7.1 活断层

### 7.1.1 活断层的概念

(1) wood(1916)定义是：在历史时期内均发生过运动，并且有现代继续活动的地表形态证据。

(2) Willis (1923)：活动断层是与地震活动有关的今后仍可能发生运动的断层。

(3) 中国科学院(1956)第一次新构造运动座谈会上，许多地质学家和地理学家使用新断层和第四纪断层来描述使新生代地层或第四纪地层发生错断或有明显地貌显示的年轻断层。

# 目前活断层的时间界限标准

(1) 前第四纪。是纯地质界的早期标准。

(2) 以早中更新世为界限标准。是基于地震和活断层关系研究成果。

(3) 活断层标准划分在中、晚更新世，距今50~10万年以来。既考虑到大部分地震与这一时期的新构造活动有关，也考虑到特殊工程如核电工程的设计要求。典型代表是原子能机构。

(4) 历史时期和全新世。充分考虑最晚活动时代的断层对工程影响的重要性，考虑工程使用期。

# 1. 能动断层

美国原子能委员会(USNEC)于1973年提出能动断层概念

定义是：在不久的将来可能活动的断层谓之能动断层。一般说，在过去3.5万年里该断层曾有过活动。

## 2. 发震断层

发生过或可能发生破坏性地震的活断层叫发震断层。

对发震断层我们可以这样理解：

(1) 发震断层是活断层，但活断层不一定是发震断层。

(2) 从工程角度来看，首先应考虑将来发生破坏性地震的活断层。

(3) 根据地震发生的重复性特点，过去发生破坏性地震的活断层有可能再次活动发生破坏性地震，无非是不同活断层所发生破坏性地震的重复间隔不同而已。

### 3. 全新活动断层

在近期地质时期(一万年)内有过较强烈地震活动或近期正在活动，在将来(今后一百年)可能连续活动的断层。

## 4. 非活动断层

最近地质时期未曾活动过，不远将来可能不活动，或其活动对工程无危害的断层。如果进一步明确可以定义一万年以来没有发生任何形式活动的断层称为非活动断层。

## 5. 工程活动断层

李兴唐教授（中科院地质所，1988）：

第四纪以前形成的断裂(层)，在第四纪晚期活动过，在工程运行期可能活动并影响到工程安全的断裂(层)。

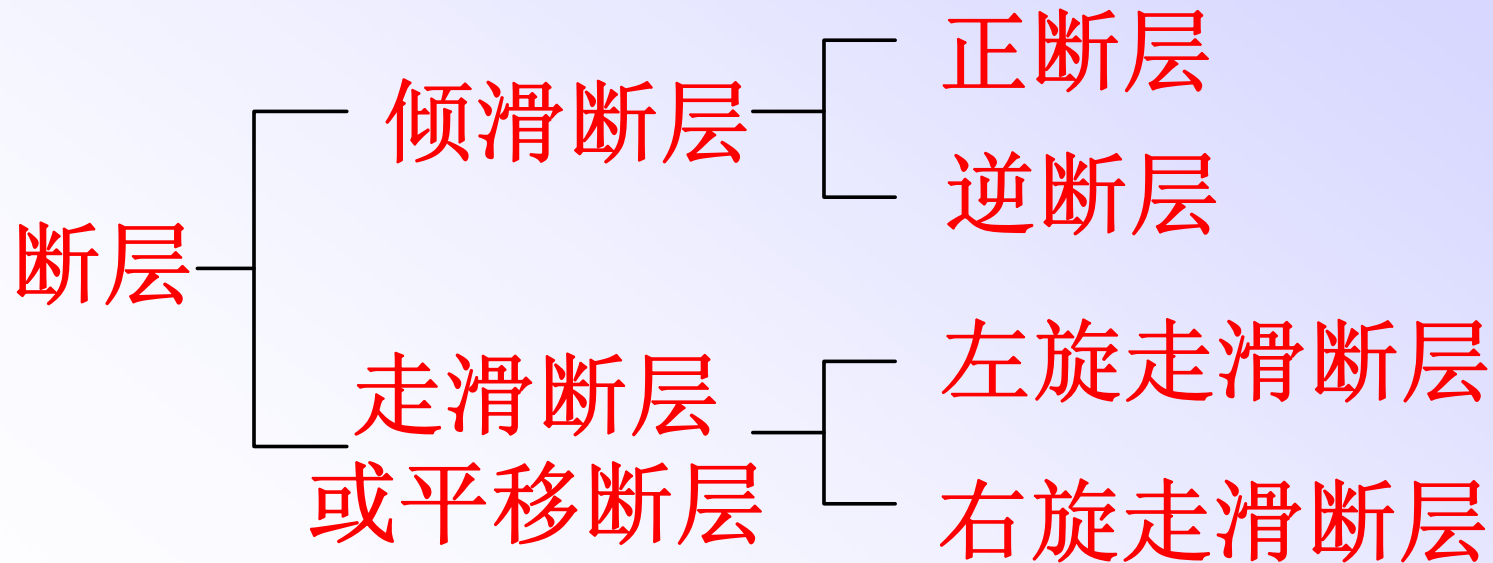
工程活动断层的主要类别标志是：

- (1) 更新世多次活动，全新世至少一次活动的断层；
- (2) 存在地层错断、地形、地貌、地球物理、地球化学等标志；
- (3) 破坏性地震历史记载或近期小震活动；
- (4) 现代蠕动或经测量有明显位移者。



## 7.1.2 活断层分类

### 1. 按力学性质分类



## 2. 按活动时代分类

### 美国地质调查所（1978）：

- （1）历史时期活断层；
- （2）全新世活断层；
- （3）第四纪后期活断层；
- （4）第四纪活断层；
- （5）新生代后期活断层；
- （6）新生代活断层。

### “中华人民共和国地震构造图（1：400万）

- （1）第四纪；
- （2）晚第三纪
- （3）新生代以来的断层。

### 3. 按滑动速率分类

级 别	AA	A	B	C
平均活动速率 S (mm/year)	$100 > S \geq 10$	$10 > S \geq 1$	$1 > S \geq 0.1$	$0.1 > S \geq 0.01$

### 4. 按切穿深度分类 (张文佑、黄汲清)

- (1) 岩石圈断裂，切穿岩石圈而达到软流圈；
- (2) 地壳断裂，切穿地壳而达到莫霍界面；
- (3) 基底断裂，切穿上地壳花岗岩质层而达到康拉德面；
- (4) 盖层断裂，切穿沉积盖层达到基底差异

## 5. 综合分类

《岩土工程勘察规范》(GB50021-94)

表7-5 全新活动断层分级

断层分级		活动时代及活动性	活动速率 $v$ (mm/y)	地震强度 $M$
I	强烈全新活动断层	中或晚更新世以来活动, 全新世以来活动强烈	$v \geq 1$	$M \geq 7$
II	中等全新活动断层	中或晚更新世界以来有活动, 全新世以来活动较强烈	$1 > v \geq 0.1$	$7 > M \geq 6$
III	微弱全新活动断层	全新世以来有微弱活动	$v < 0.1$	$M < 6$

## 7.1.3 活断层的识别方法与标志

- 1. 遥感分析

- (1) 通过航空照片及航空红外影象

- 1) 断层崖壁(陡崖)、陡坎;
    - 2) 水系变化、河流弯曲、错动等;
    - 3) 冲沟, 山脊错动、扭曲等;
    - 4) 河流阶地的变化;
    - 5) 洪积扇叠置反映出山区上升, 平原沉降。

## (2) 陆地卫星影象分析

1) 一系列的湖泊、洼地呈串珠状排列，它们所展布的线，可能是第四纪断层。

2) 错动河流、山脊。这种现象在影象上表现为直角转折，河流一侧支流同步弯曲，河流呈‘人’字形、‘S’形等都表明地块在第四纪时期受到水平的断裂活动。

3) 山区与平原或台地交界，山前存在陡崖、洪积扇叠置或错动。这表明山区上升，平原沉降，沿山前存在活断层。

## 2. 地貌学分析

地形陡崖、洪积扇叠置或错动等；河流纵剖面‘裂点’，河流、水系、山脊水平位错。

## 3. 地质学方法

新地层中断层面或破裂面的存在；基岩的断裂有活动迹象，如新火山岩体，温泉，湖泊分布，植物异常等。

## 4. 地球化学分析

沿断层带表现为氢、氦、氡、二氧化碳等气体浓度变化，土壤中敏感元素异常等。

## 5. 地震活动及观测

现代地震震中呈线状分布。

## 6. 形变测量

利用水准仪或GPS对断层进行位移的长期监测。

## 7. 浅层地震勘探和地质雷达扫描



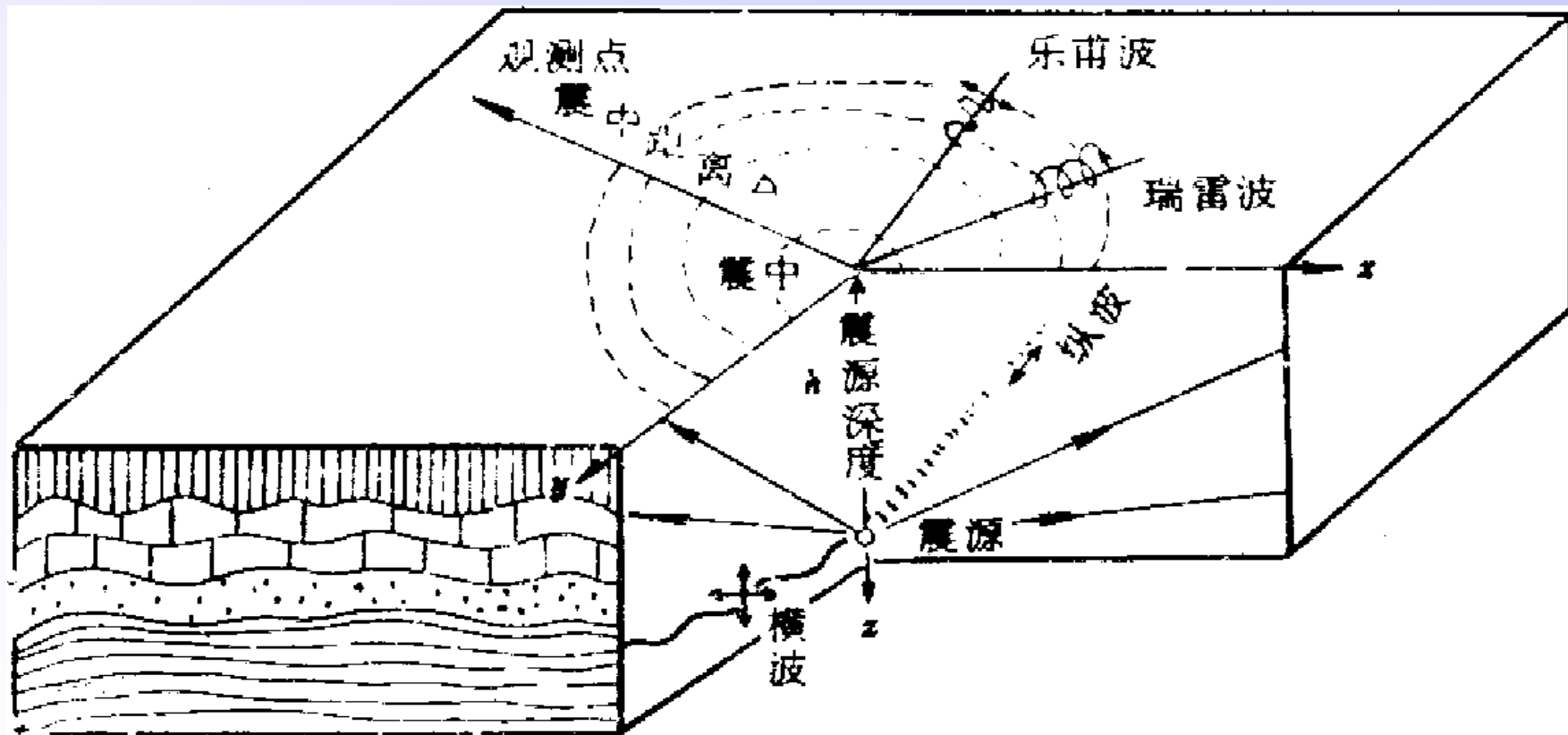
# 7.2 地震

## 7.2.1 地震基础知识

地震——当地下某处岩层突然破裂或因局部岩层塌陷和火山喷发等发生了振动，并以波的形式传到地表引起地面的颠簸和摇晃，这种地面运动就叫做地震。是地壳所及类应变能的一种释放方式。

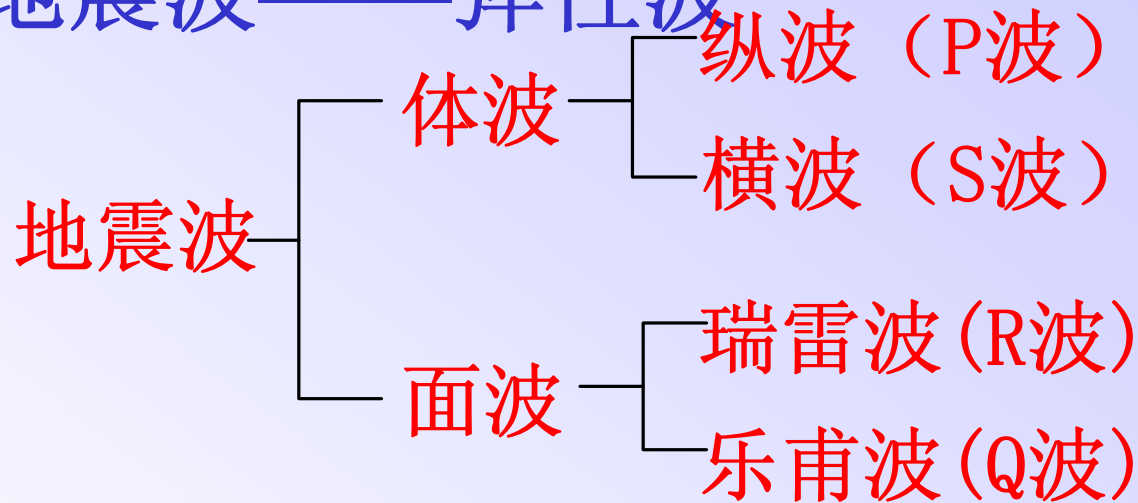
据统计，全世界每年约发生地震**500万次**。其中绝大部分很微弱不为人感知，人们有感觉的约**50000次**，造成破坏的约**1000次**，其中很大破坏性的强震约**十几次**。

地震引起的振动以波的形式从震源向各个方向传播 ——



地震波传播与运动形式示意图

# 1. 地震波——弹性波



$$V_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}$$

$$V_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\mu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

$$V_p = 1.67V_s$$

$$V_R = 0.914V_s$$

## 2. 震级

- 震级是地震大小和强度的一种量度标志**1935年李希特(Richter)**在研究美国南加里福尼亚地震时所得公式而给出的:

- $$M = \log A$$

- $M$ —震级;
- $A$ —用周期为**0.8s**, 阻尼为**0.8**, 放大倍数为**2800倍**的标准地震仪(**wood-Anderson地震仪**)**在距震中100km**处记录到的以  $\mu m$  为单位的最大水平地动位移(单振幅)

# 我国

## (1) 计算近震(震中距 $\Delta < 1000\text{km}$ )震级公式

$$M_L = \log A_u + R(\Delta)$$

$M_L$ —震级;

$A_u$ —记录到的水平地动位移 ( $\mu\text{m}$ );

$R(\Delta)$ —起算函数,随震中距和仪器性能而定。

## (2) 计算远震( $\Delta > 1000\text{km}$ )震级公式

$$M_s = \log \left( \frac{A_u}{T} \right)_{max} + \sigma(\Delta)$$

$M_s$ —根据面波求得的震级;

$T$ —相应于 $A_u$ 的振幅;

$\sigma(\Delta)$ —面波震级的起算函数

(1)  $M_L$ 与 $M_S$ 可按下式换算:

$$M_s = 1.13M_L - 1.08$$

(2) 震级 $M$ 与地震释放能量 $E(J)$ 关系:

$$\log E = 11.8 + 1.5M$$

一个1级地震的能量相当于 $2 \times 10^6 J$ ,  
震级每增加一级能量增大30倍左右  
一个7级的破坏性地震相当于近30个2万吨TNT  
的原子弹所具有的能量。

### 3. 地震烈度

地震烈度是指某一地区地面和多类建筑物遭受一次地震影响的强烈程度。

刘恢先（1980）：地震烈度是地震时一定地点地面震动强烈程度的尺度；指该地点范围内平均水平而言

## (1) 基本烈度

在一定时期内，一个地区可能遭遇到的最大地震烈度被称为该地区基本烈度。以一百年一般场地条件下(标准II类土)，一般地形、地貌、构造及水文地质条件，可能遭受到的最大烈度作为基本烈度，全国地震烈度图即为全国基本烈度区划图。

- (2) 设防烈度

这是一个地区经过有关部门批准的设防依据。一般按地震区划图中的基本烈度采用，但不一定等于基本烈度。对于一个地区，各类建筑物的设防烈度相同。

- (3) 设计烈度

是针对一个具体建筑物而言，根据建筑物的重要性的不同而提高或降低。



## (1) 常遇烈度

结构在此烈度作用下处于小震不坏的弹性阶段。一般以50年超越概率63.2%标准的烈度作为设防标准，一般比设防烈度约低一度半。

## (2) 设防烈度

结构在此烈度作用下处于弹塑性阶段。一般以50年超越概率10%~13%遭遇烈度作为设防标准，即相当于基本烈度。

## (3) 罕遇烈度

结构在此烈度作用下处于大震不倒的弹塑性阶段。一般以50年超越概率2%~5%罕遇烈度作为设防标准。一般比设防烈度高一度弱。

## 7.2.2 地震活动规律

- 1. 地震主要与活动性断裂带或与这种活动性断裂带的一些特殊部位相联系
- 2. 地震活动表现为时强时弱的阶段性或周期性
- 3. 强震活动常沿活动构造带(构造体系)依次迁移或往返跳动
- 4. 地震区域里强震与弱震、大震与小震之间，往往存在着时空关系

## 7.2.3 地震效应

在地震作用影响所及的一定范围内，于地面出现的各种震害和破坏，称之为地震效应。

地震效应与场地工程地质条件、震级大小及震中距等因素有关。

# 1. 振动破坏效应

## 地震最大水平加速度

$$a_{max} = \pm A \left( \frac{2\pi}{T} \right)^2$$

建筑物所承受的最大水平惯性力P为

$$P = \frac{W}{g} a_{max}$$

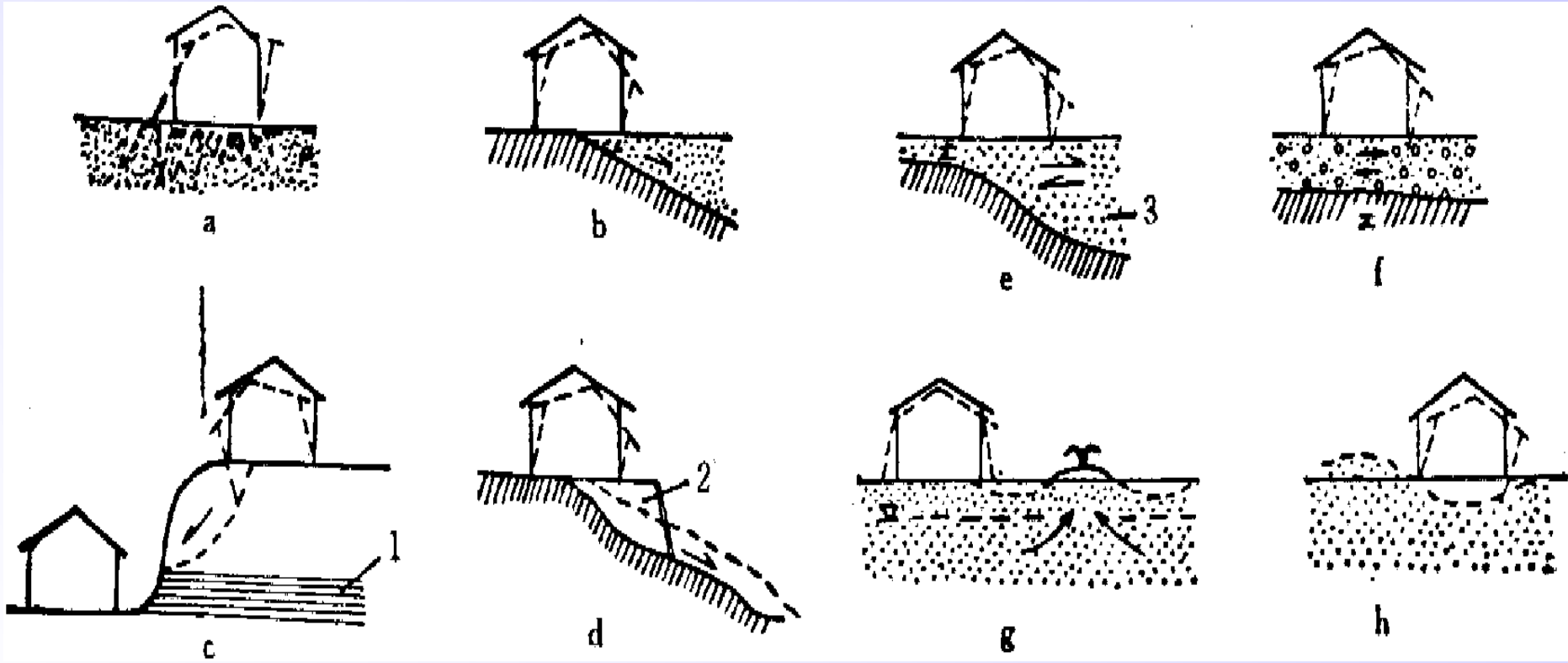
水平地震系数

$$K_c = \frac{a_{max}}{g}$$

当 $K_c=1/100$ 时建筑物开始破坏，而 $K_c=1/20$ 时建筑物将严重破坏。

## 2. 地面破坏效应

断裂效应	地震断层
	地震裂缝
斜坡效应	崩塌
	剥落
	滑坡
	坍滑
	流滑
	泥石流
地基效应	沉降
	砂土液化



地基失效造成建筑物破坏

## 7.2.4 场地地质条件对震害的影响

影响场地烈度的地质因素主要有岩土性质、地质构造、地貌和水文地质条件。

(1) 地震刚性大的岩土，实际烈度就小。

地震刚性小的岩土则实际烈度就高

(2) 同一地震基本烈度区，饱水砂砾层的实际地震烈度，较不饱水砂砾土层的实际地震烈度要增加0.4~0.6度。地下水埋藏愈浅，地震烈度增加愈高。

(3) 岩层产状愈不利于岩体滑动，地形愈平缓，破坏效果就愈小；

地形愈陡，特别是风化、卸荷强烈的山坡峡谷地带，容易形成山崩和滑坡，增加地震力的实际效果。

## 7.3 砂土液化

(1) 大面积的喷砂冒水，掩盖了农田，淤塞了渠道。

(2) 砂土液化造成渠道、河道的岸边向河内滑移，使河堤及许多排灌设施遭到严重破坏。

(3) 道路、桥梁因砂基液化而引起的破坏最为严重。

(4) 工业与民用建筑遭到破坏



## 7.3.1 砂土液化的概念

广义地说，在一定条件下，原为固体的物质转化为流动状态的液体，这种现象叫做液化。

- 美国土木工程师学会土动力学委员会（1978）  
“液化—任何物质转化为液体的行为或过程，就无粘性土而言，这种固体状态变为液体状态的转化是孔隙水压力增大而有效应力减少的结果。”
- 饱水的松散砂受到振动时砂体有变密趋势。如果砂粒很细，透水性不良，瞬时振动必然使砂体中孔隙水压力上升，使砂粒之间的有效正应力随之而降低。当孔隙水压力上升到使砂粒间有效正应力降为零时，砂粒就完全悬浮于水中，砂体也就完全丧失了强度和承载能力，这就是砂土液化。

## 7.3.2 地震砂土液化机制

砂土的抗剪强度

$$\tau = \sigma \tan \varphi$$

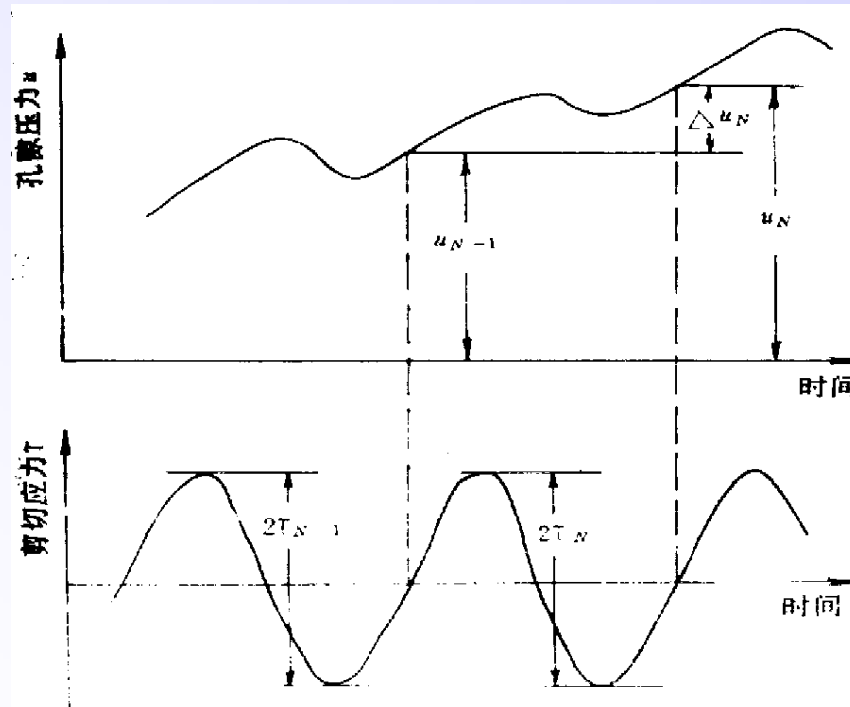
当砂土处于饱和状态时，由于静止孔隙水压力的作用，其抗剪强度将小于完全固体状态的抗剪强度，并可由下式求得：

$$\tau = (\sigma - u_0) \tan \varphi \approx \sigma_0' \tan \varphi$$

$u_0$ —静止孔隙水压力；  
 $\sigma_0'$ —有效法向应力。

# 砂土液化的过程和机制

H.B.Seed (1966) 采用室内动力剪切试验法模拟砂土在地震时的应力状态



孔隙水压力随地震剪应力循环而累积

在振动荷载反复作用下，疏松的砂土将趋于密实，使砂土的透水性减少，在瞬间荷载作用下水不能排走，在原来孔隙水压力的基础上产生附加孔隙水压力 $\Delta u$ 。而有效法向应力则随着孔隙水压力的增加而相应的降低，这时饱和砂土的抗剪强度为：

$$\tau = [\sigma - (u_0 + \Delta u)] \tan \varphi$$

$$\tau = (\sigma - u) \tan \varphi$$

$\Delta u$ — 因振动产生的附加孔隙水压力；

$u = u_0 + \Delta u$ — 总的孔隙水压力。

(1) 当 $\tau/\tau_d > 1$ 时，处于稳定状态，而不会产生液化。

(2) 当 $\tau/\tau_d = 1$ 时，处于极限平衡状态，这时砂土的剪切面开始发生破坏——做初始液化。

(3) 当 $1 > \tau/\tau_d > 0$ 时，两种发展趋势

① 当砂土密实而发生剪胀时，孔隙水压力由逐渐增加而转化为迅速降低，则抗剪强度有所恢复，由局部液化转化为固态。

② 疏松的砂土发生剪胀时，孔隙水压力继续上升，致使等于总压力，全部荷载由孔隙水压力所承担，有效应力及抗剪强度均为零，即 $\tau/\tau_d = 0$ ，砂颗粒间脱离接触而处于悬浮状态，完全液化了。

## 7.3.3 砂土液化的形成条件及影响因素

### 1. 土层液化的形成需要具备以下几个条件:

(1) 地面下一定深度内埋藏有可液化砂层。

砂土和粉土(松散饱水粉细砂层, 淤泥质粉细砂层及塑性的粉土层)。

(2) 液化土层埋深和地下水埋深

液化层 $<9\text{m}$ 、地下水埋深 $<4\text{m}$ 可作为液化条件

(3) 地震动强度和历时。

液化一般出现在地震烈度6度地区, 较严重的液化出现在7度以上地区。

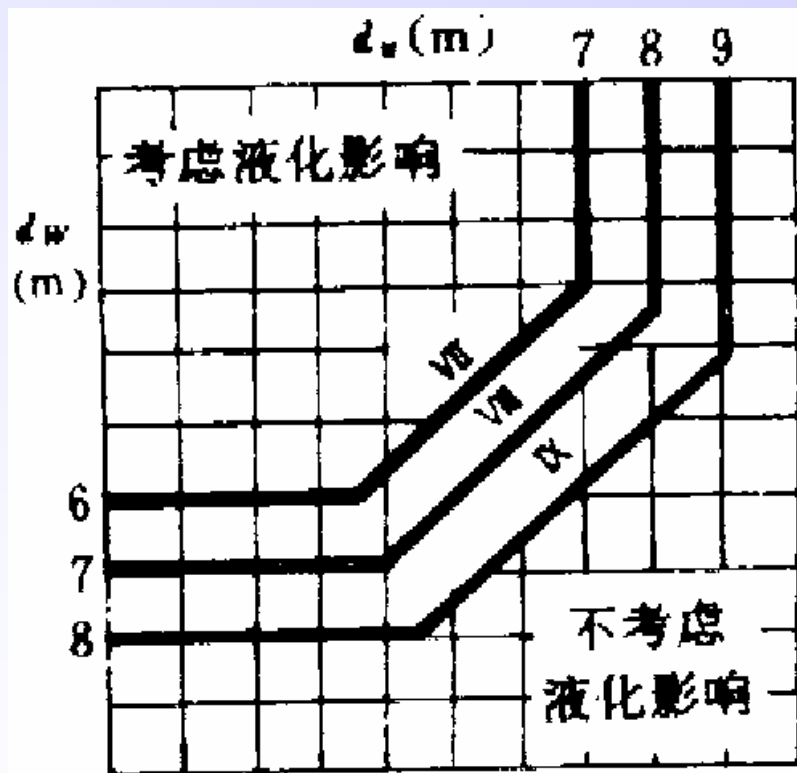
### 2. 土层液化的影响因素

液化土层本身特征, 分布埋藏条件, 振动强度及历时等

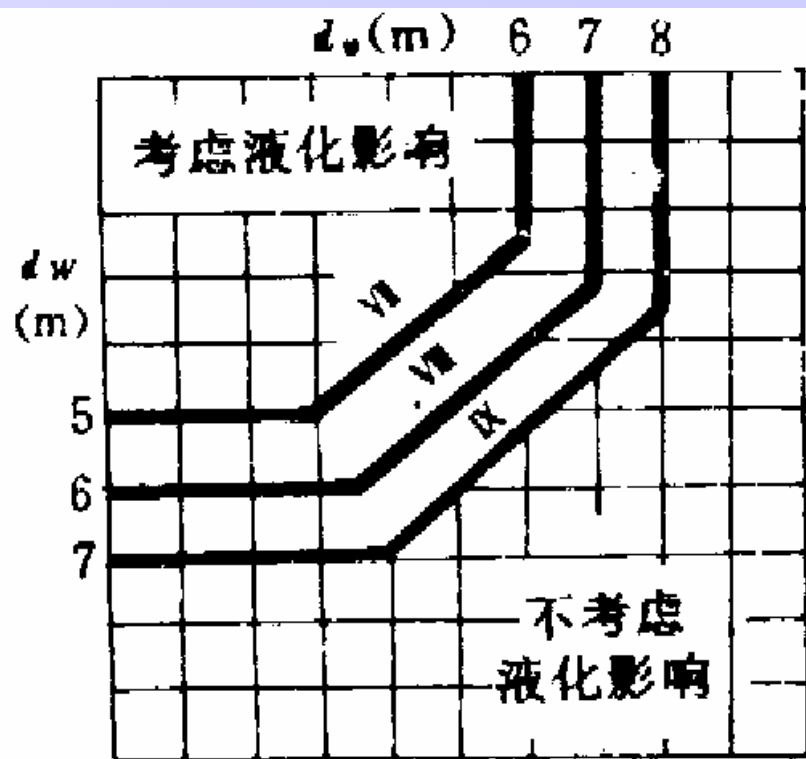
## 7.3.4 地震液化可能性判别

先初判有没有可能液化；如果有可能，才进行详判，确定液化势（《建筑抗震设计规范》（GBJ11-89））

- (1) 当地震烈度为6度时，可不考虑饱和土的液化；
- (2) 地基土为第四纪晚更新世(Q3)或其以前时，可判为不液化。
- (3) 地震烈度7度、8度、9度，粉土的粘粒含量 $P_c$ 分别不小于10%、13%和16%时，可判为不液化。
- (4) 天然地基上基础埋藏深度 $d_b$ 和上覆非液化土层厚度 $d_u$ 位于图7-8中不考虑液化影响区时，可不考虑液化影响。



(a) 砂土



(b) 粉土

## 砂土液化初判图



# 7.4 地面沉降

大约从20世纪初，世界上一些工业迅速发展，因而大量开发利用地下水的大城市和一些石油开采区陆续发现地面沉降现象

## 地面沉降造成的危害：

- (1) 许多沿海城市，地面标高低于或接近于海平面高程。
- (2) 码头、堤岸的沉降而丧失或降低了港湾设施的能力。
- (3) 桥墩下沉，桥梁净空减小，影响水上交通。
- (4) 伴随发生较大水平位移，地面和地下构筑物破坏。
- (5) 深井管上升、井台破坏，高楼脱空，桥墩不均匀下沉

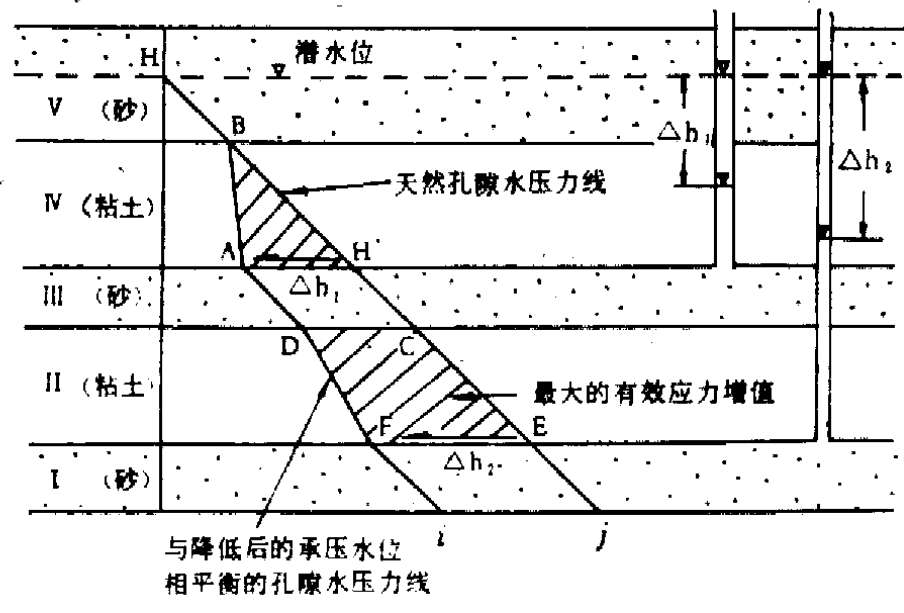
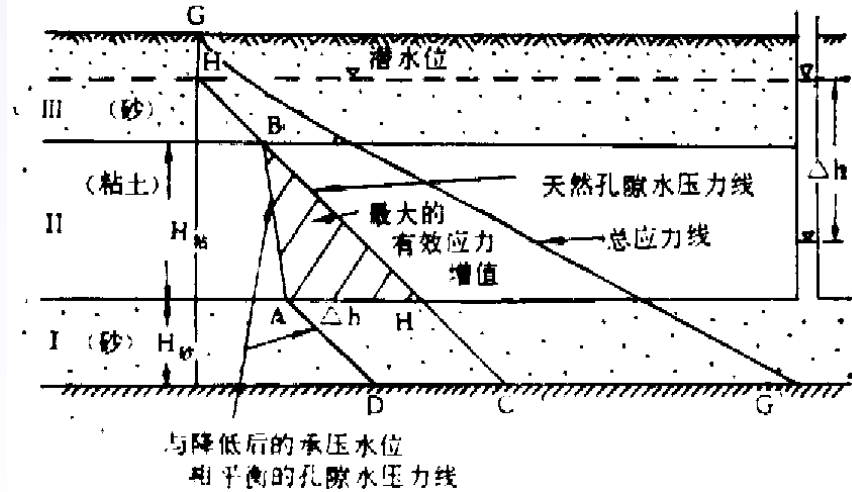
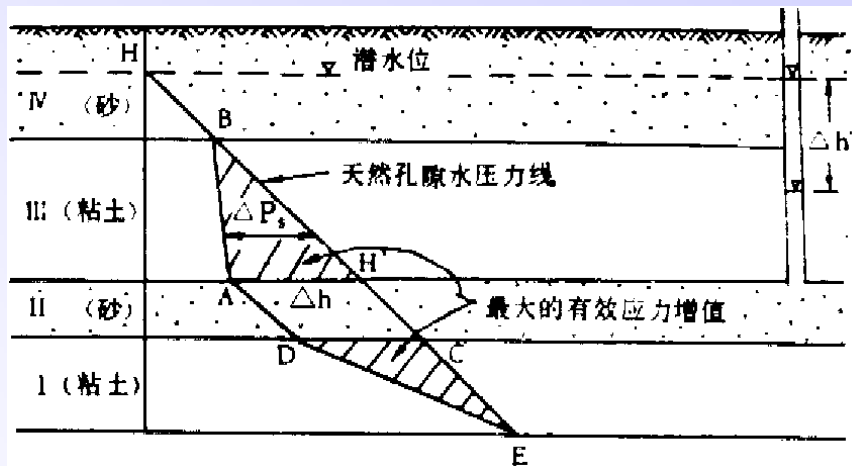
## 7.4.2 地面沉降的形成机制及产生条件

### 1. 地面沉降的形成机制

土的固结理论知，土中由覆盖层荷载引起的总应力 $\sigma$ 是由孔隙中的水 $p_w$ 和土颗粒 $p_s$ (通过接触点)共同承担的

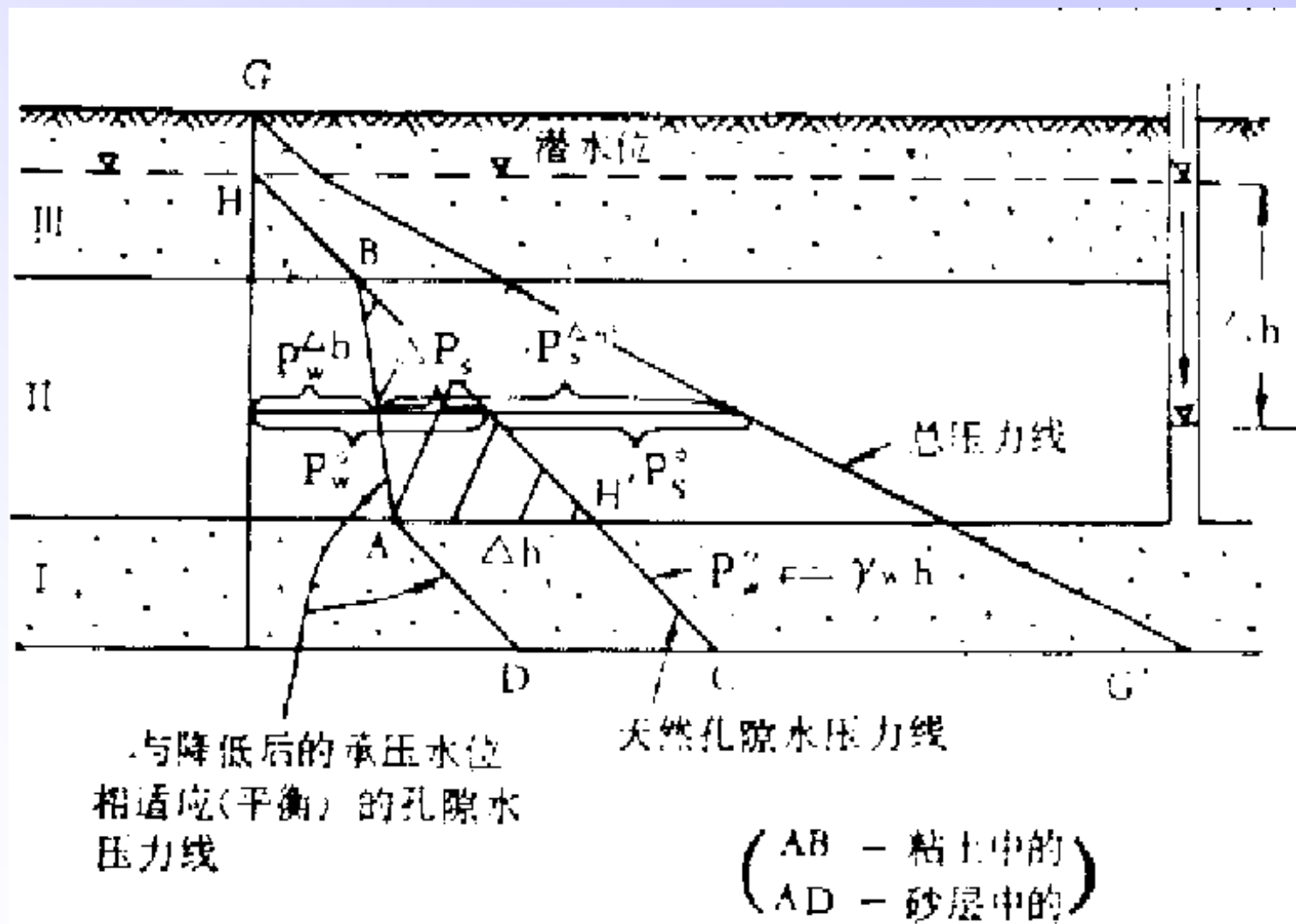
$$\sigma = p_s + p_w$$

假定抽水过程中土层内的总应力不变，那么孔隙水压力的减小必然导致土中有效应力的等量增大，结果就会引起土层成比例的固结。

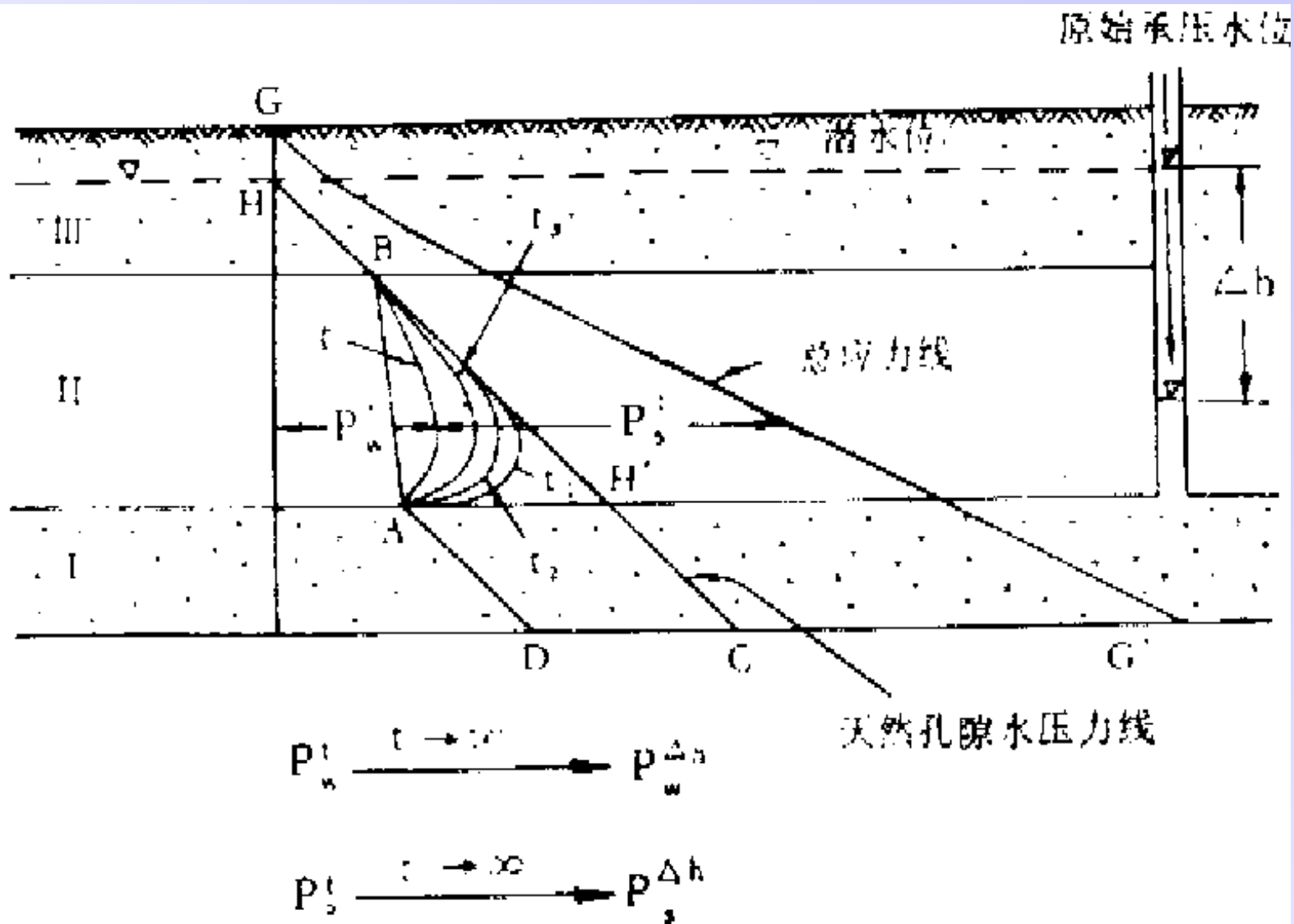


与降低后的承压水位相平衡的孔隙水压力线

## 不同地质结构条件下抽水引起的有效应力变化图解



三层结构条件下单层抽水引起的有效应力的变化及粘土层的压密



三层结构条件下单层抽水引起的有效应力的变化及粘土层的压密

土层中总的最大有效应力增值将等于 $\Delta ABH'$ 面积，而砂层中总的有效应力增值则将等于平行四边形 $AH'CD$ 的面积。

上述有效应力的增大必将导致土层的固结和压密。根据土力学的基本原理，砂层和粘土层的最终压密量将分别等于：

$$S = \frac{\gamma_w \cdot \diamond AH'CD}{E} = \frac{\gamma_w \cdot \Delta h \cdot H_{\text{砂}}}{E}$$

$$S_{\infty} = \frac{a_v}{1 + \varepsilon_0} \cdot \gamma_w \cdot \Delta ABH' = \frac{a_v}{2(1 + \varepsilon_0)} \cdot \gamma_w \Delta h \cdot H_{\text{粘}}$$

## 2. 地面沉降的产生条件

(1) 从地质、水文地质条件来看，疏松的多层含水体系；

(2) 其中承压含水层的水量丰富，适于长期开采；

(3) 开采层的影响范围内，特别是它的顶、底板，有厚层的正常固结甚或欠固结的可压缩性粘土层等，对于地面沉降的产生是特别有利的。

(4) 从土层内的应力转变条件来看，承压水位大幅度波动式的趋势性降低，则是造成范围不断扩大的、累进性应力转变的必要前提。