



Fundamentals of Hydrogeology

水文地质学基础

第五章 包气带水的运动

中国地质大学（武汉）水文地质学基础教学组

本章内容



5.1 毛细负压与毛细压力水头

5.2 毛细压力水头的测定方法

5.3 毛细上升高度与速度

5.4 包气带水的下渗运动

5.5 包气带岩石的渗透系数

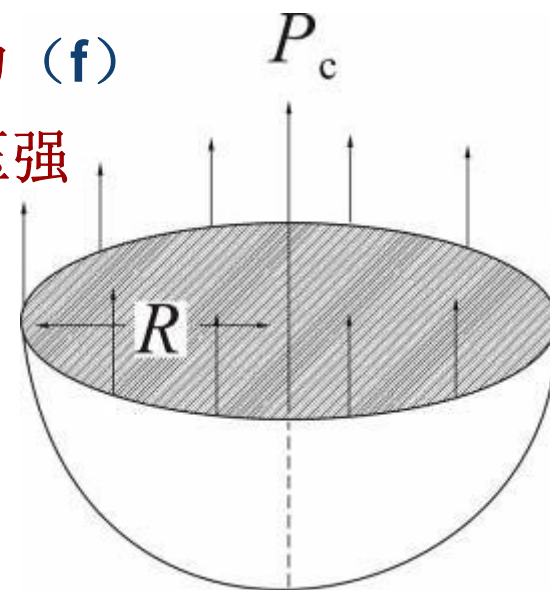
5.1 毛细负压与毛细压力水头

- ❖ 包气带特点——复习
- ❖ 毛细水中：讨论过 毛细现象、毛细力、毛细水的存在形式
- ❖ 毛细负压（毛细水头），毛细上升高度，毛细上升速度

毛细负压与毛细压力水头

- 液体表面有一个张力（相互吸引，如同一个薄薄的膜）液面就会发生弯曲，当弯曲呈半圆形时（细小）
- 弯液面上，表面张力的合力称为毛细力（ f ）
- 作用在弯液面（半圆）上，称为毛细压强

$$p_c = \frac{f}{s} = \alpha \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$



5.1 毛细负压与毛细压力水头

- ❖ 当弯曲液面为半圆时（湿润角 $\beta = 0$ ）， $R_1 = R_2$

$$p_c = \alpha \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = \frac{2\alpha}{R} = \frac{4\alpha}{D} \quad \text{直径}$$

α 为液体的表面张力系数， R_1 与 R_2 为弯曲液面的2个曲率半径

- ❖ 毛细压强是有方向的，对液面来说（是水），这是个负压强——又称**毛细负压**（ p_c ）

毛细负压

- ❖ 压强转化为水柱高度表示（ h_c ）
（下面继续介绍）

5.1 毛细负压与毛细压力水头

❖ 压强转化为水柱高度表示 (h_c)

$$h_c = \frac{p_c}{\rho g} = \frac{p_c}{\gamma_w} \approx \frac{0.03}{D}$$

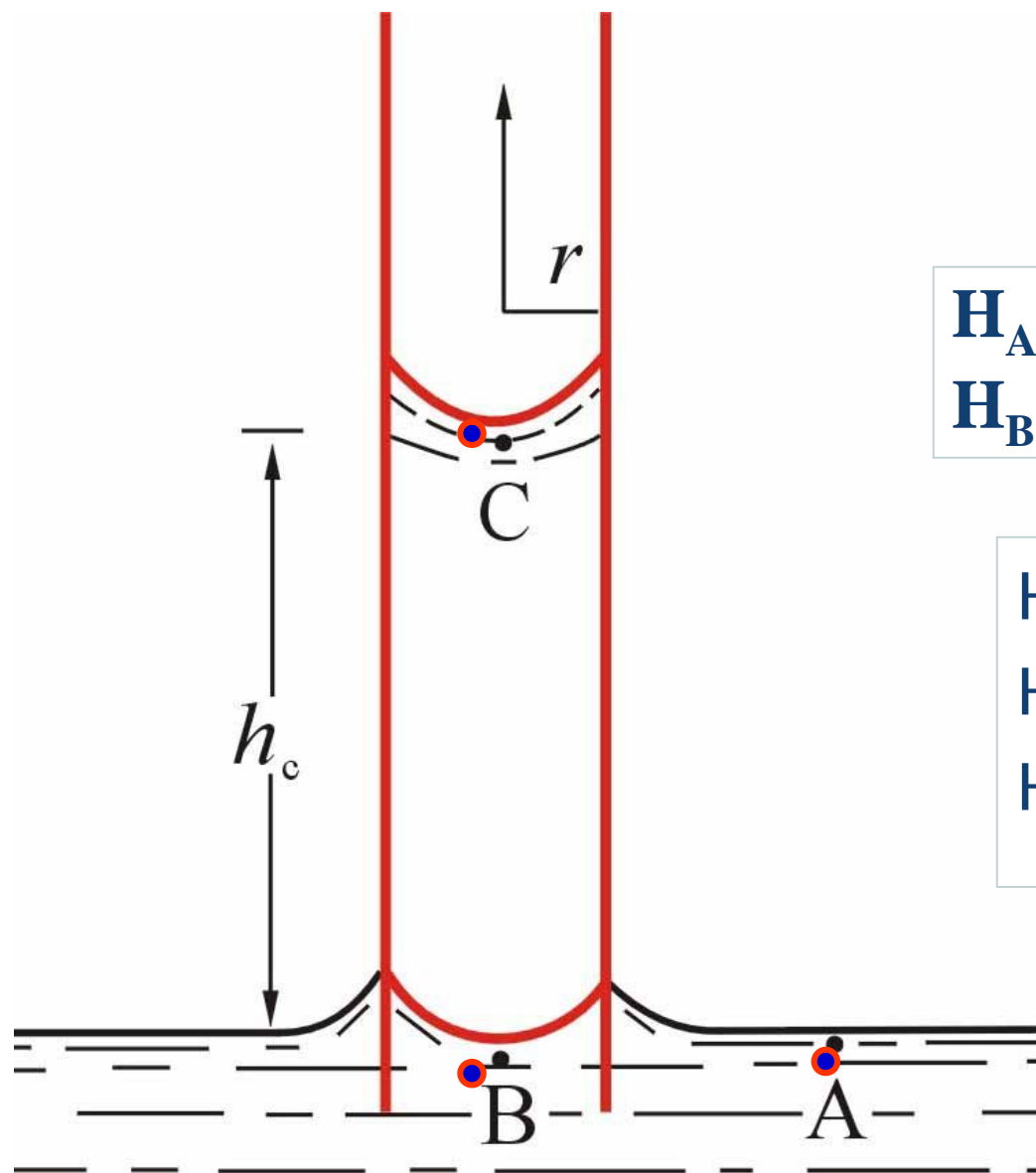
❖ ρ 取 1g/cm^3 ; $g = 981\text{cm/s}^2$,
 $\alpha = 74\text{dyh/cm} = 74 \times 10^{-3}\text{N/m}$

D——毛细管直径 (用**mm**表示)

❖ h_c ——**毛细压力水头** (m) 又称毛细压头

毛细压头

毛细压力水头，又称毛细压头



$$H_A = Z_A + h_A$$

$$H_B = Z_B + h_B$$

$$H_A = 0$$

$$H_B = ?$$

$$H_C = ?$$



5.2 毛细压力水头的测定方法:

❖ 在**饱水带**中（用水力学原理）：测量任一点的压力水头—用**测压管（压力计）** $H_A = Z_A + h_A$

❖ 在**包气带**中（测负压）：**张力计（tensionmeter）** 张力计

前端装上多孔陶瓷头（捧）；插入土中；张力计管中充满了水，在非饱和土中，空隙中的负压与张力计液面高度平衡后，张力计形成的负压与所测点B相等时，张力计上的 $-h_c^B$ 即为测点的负压

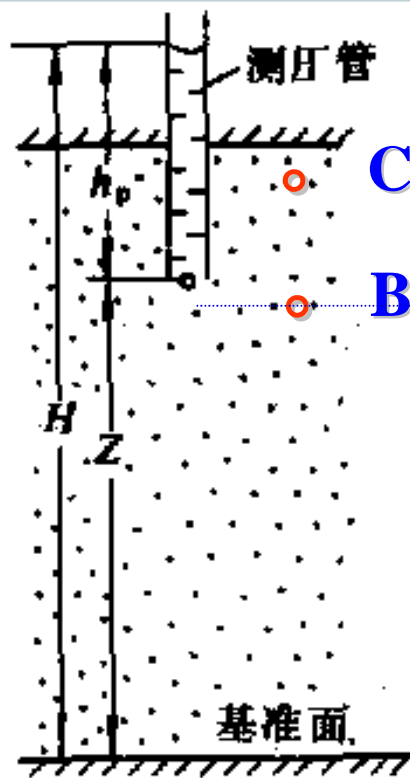
例： $H_B = Z_B + h_c^B = Z_B + (-h_c^B) = H_B$ （图示）

■ 如果测得包气带中 $H_B > H_C$ ，其意义如何（与水力学水头概念一致），水流运动方向为 $B \rightarrow C$ ，入渗水流

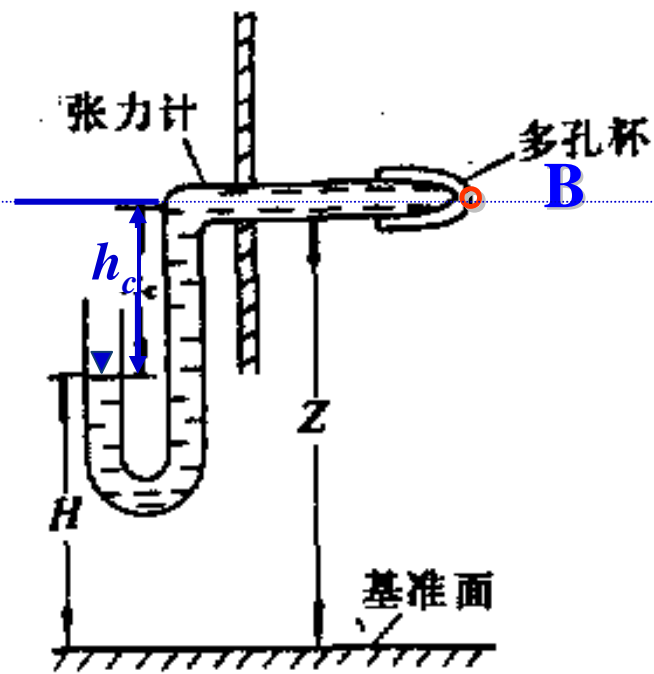
■ 如果测得包气带中 $H_B < H_C$ ，水流运动方向为 $C \rightarrow B$ ，水流??



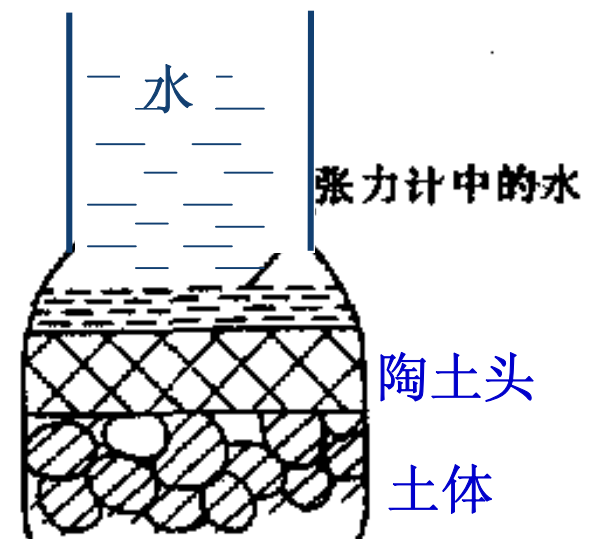
负压测量仪——张力计



(a)



(b)



5.3 毛细上升高度与上升速度

5.3.1 毛细上升高度与毛细上升速度

毛细压力水头与毛细压强的概念，观察毛细管中水的运动

1) 插入水中初始：瞬时刻

$$\diamond H_A = Z_A + 0 = 0$$

毛细水上升高度

$$\diamond H_B = ? \quad H_B = Z_B + p_c / \rho g$$

$$\diamond H_B = Z_B + (-h_c) = -h_c$$

$$\diamond H_C = ? = Z_C + (-h_c) = 0$$

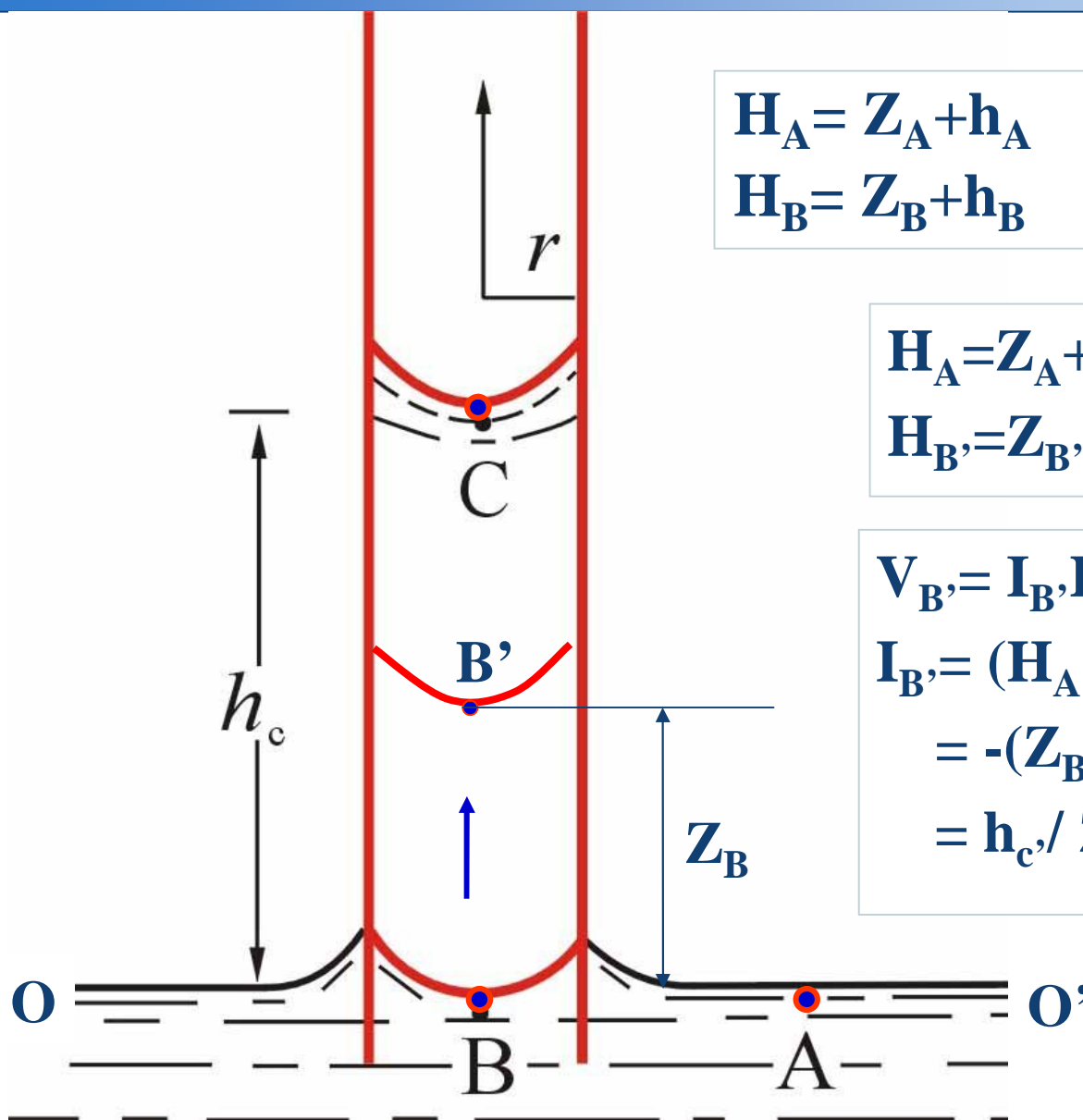
2) 最后： $H_A = H_C$ （管中水不运动—静止液体）

此时毛细管中的最大上升高度 h_c 称为毛细上升高度，

它在数值上等于该管所具有的毛细压力水头值

转下页

毛细水运动推导



$$H_A = Z_A + h_A$$

$$H_B = Z_B + h_B$$

$$H_A = 0$$

$$H_B = -h_C$$

$$H_A = Z_A + h_A$$

$$H_{B'} = Z_{B'} + h_{B'}$$

$$V_{B'} = I_{B'} K$$

$$I_{B'} = (H_A - H_{B'}) / L_{A \sim B'}$$

$$= -(Z_B - h_C) / Z_{B'}$$

$$= h_c / Z_B - 1$$

5.3.2 毛细上升速度

❖ 用达西定律分析：水由 $B \rightarrow B'$ 毛细水的运动 $V_c = I K$

A点水头 ? $H_A = Z_A + 0 = 0$

B'点水头 ?

$$H_{B'} = Z_{B'} + (-h_c) = Z_{B'} - h_c$$

▪ $V_c = I K$

▪ $I_c = (h_c / Z_{B'} - 1)$ 假设 K 不变,

❖ 讨论 V_c , $V_c = f(I_c)$

毛细水上升速度

① $Z_{B'} \rightarrow 0$ 时, 毛细上升刚开始,

$$h_c / Z_{B'} \rightarrow \infty \quad I \rightarrow \infty \quad V \rightarrow \text{很大}$$

② $Z_{B'}$ 逐渐增大时, I 变小, 上升速度变慢

③ $Z_{B'} \rightarrow h_c$ 时, $h_c / Z_{B'} \rightarrow 1$, $I \rightarrow 0$ $V \rightarrow 0$, 上升停止

❖ 毛细水可以上升的最大高度 h_{\max} , 就等于该毛细管可以产生的最大毛细压力水头 h_c

5.4 包气带水的下渗运动

包气带水的下渗运动

（自学P48最后两个自然段—P49第一自然段）

- ❖ 上面讨论的是毛细水上升运动的情况
- ❖ 在毛细力的作用，毛细水向下运动时，情况也是一样，请大家试推导
- ❖ 毛细管的毛细压力水头为 h_c ，当下渗深度 L 小于 h_c 时，某点水下渗速度有毛细力作用

5.5 包气带中岩石的渗透系数

包气带中岩石的渗透系数K

由于没有完全饱水，水流仅在饱水的空隙中运动，因此

$$K_{(包)} = f(\omega) \quad \omega \text{ 为土层含水率}$$

- ①包气带中K不是常数；
- ② $K_{包}$ 小于饱水带中的K；
- ③随含水量增高 $K_{包} \rightarrow K$

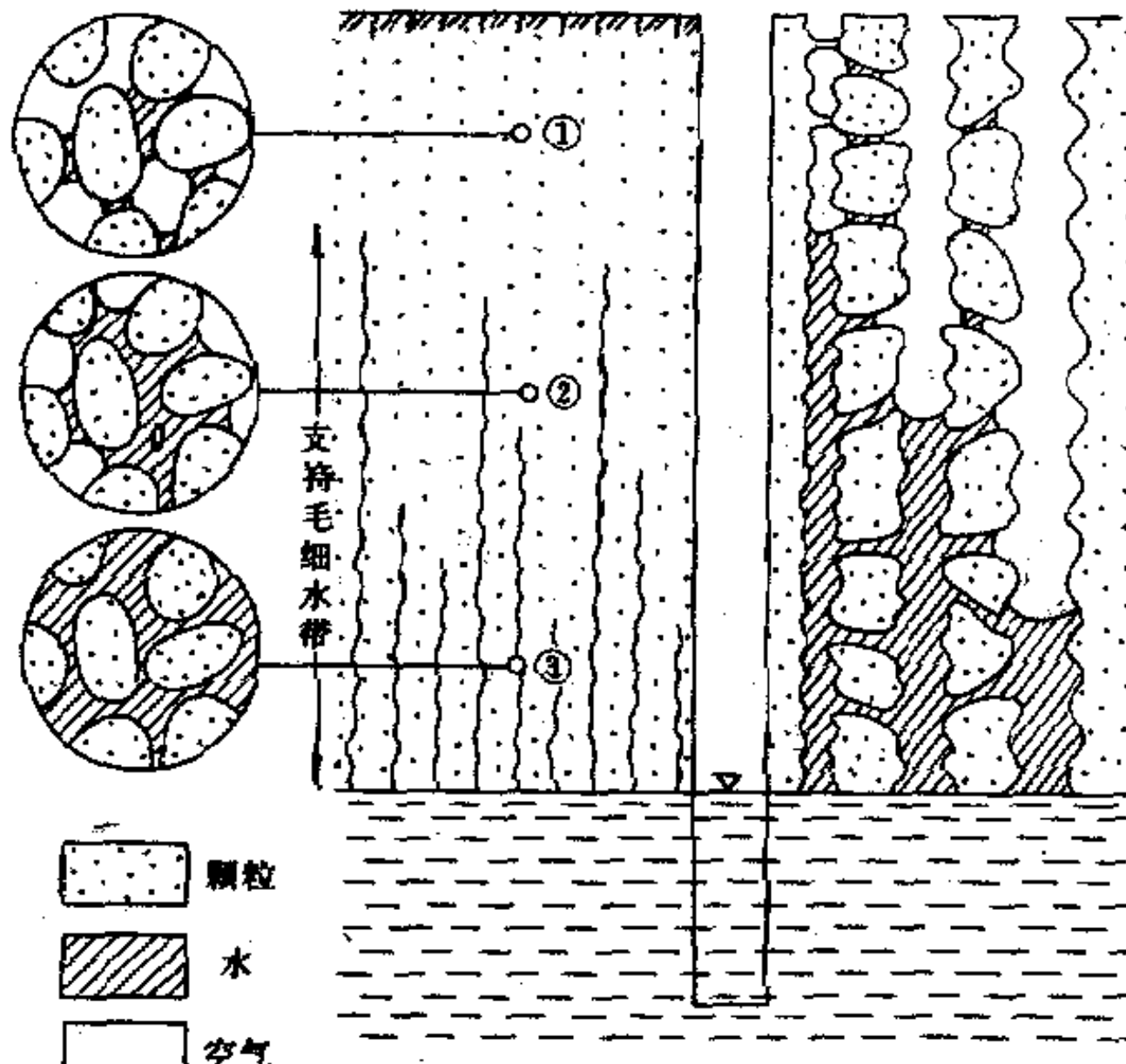
包气带岩石含水量曲线

- ❖ 毛细上升特点与孔径沿程变化有关：当为层状非均质土层时，**上升高度**？
- ❖ 沿孔隙，呈“跳跃”式前进
- ❖ **吸水时**—由毛细上升的土层含水量曲线，土层含水量较低
- ❖ **退水时**—由下渗形成土层含水量曲线，土层含水量较高

小结

$$K_{(包)} = f(\omega), \omega \text{ 为土层含水率}$$

包气带中岩石的渗透性



小结



包气带水的运动与饱水带的运动相比，有三点不同：

❖ 饱水带——重力势；

包气带——重力势+毛细势

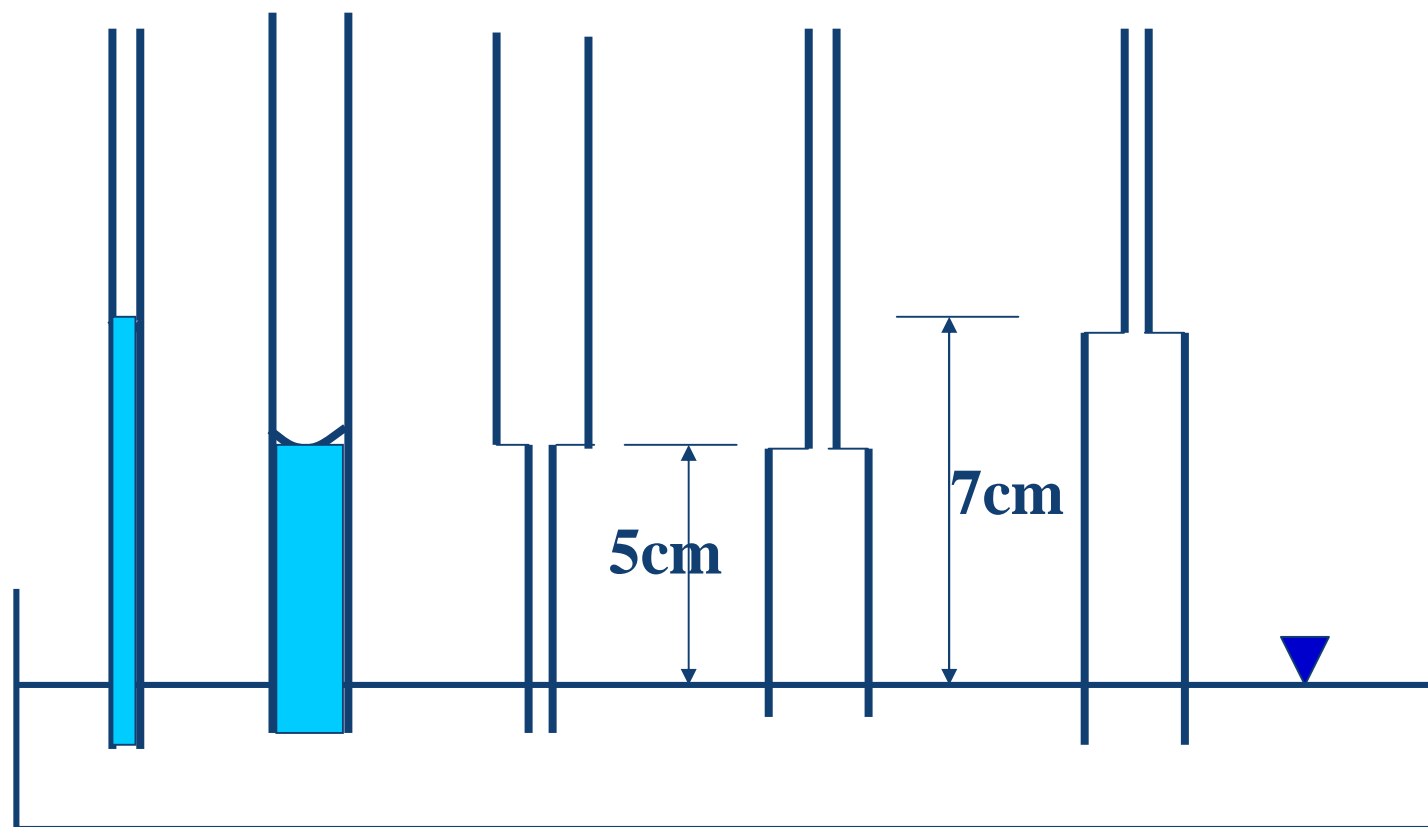
❖ 饱水带任一点水头随水位变化；

包气带水头则是含水量的函数

❖ 饱水带的渗透系数是个定值；

包气带渗透系数随含水量的降低而变小

思考题



当细管毛细上升高度为10cm，粗管毛细上升高度为5cm时，A管、B管、C管毛细上升高度各为多少？