

## 序

先に、筆者は二層帯水層（上・下二層の透水係数が違う場合）の海岸地下塩水くさびを Ghyben-Herzberg の条件、Dupuit の準一様流の仮定より理論的に取扱った。しかし、この理論に対する実験的検証に若干不十分さを感じていたため、今回はヘル・ショウモデルおよびガラス球モデルの両実験で多数の実験を行いそれらを検討した。また、二層帯水層間が不透水層によって遮断された場合の塩水くさびの取扱いについてもその考え方を理論、実験の両方から整理した。さらに、一様帯水層の海岸流出面が傾斜している場合の斜面での塩水くさびについても実験的にその挙動を研究し、近似理論が実用上有効なものという知見を得た。

## 1 二層帯水層における塩水くさび

1-1: 上・下帯水層境界で流れのある場合<sup>1)</sup>

上・下帯水層の透水係数が各々  $k_1$ ,  $k_2$  と違っているため、各々の層の流れに Darcy 則を適用し、Ghyben-Herzberg の条件および連続の関係を用いて解けば、上層および下層の塩水くさび形状はそれぞれ式 (1)、(2) のようになり、 $h_{10}$  は式 (3) のようになる。

$$\frac{2 \cdot |Q_{L1}|}{k_2 \cdot \varepsilon \cdot h_{10}^2} x = \frac{k_1}{k_2} \left\{ \left( \frac{h_1}{h_{10}} \right)^2 - 1 \right\}, \quad (1) \quad \frac{2 \cdot |Q_{L2}| (x - L_1)}{k_2 \cdot \varepsilon \cdot h_{10}^2} = 2 \frac{k_1 H_1 h_2}{k_2 h_{10} h_{10}} + \left( \frac{h_2}{h_{10}} \right)^2, \quad (2)$$

$$h_{10} = \frac{|Q_{L1}|}{\sqrt{2 \varepsilon k_1}}, \quad (3) \quad \text{ここで、} \varepsilon = \Delta \rho / \rho, \Delta \rho: \text{淡・塩水の密度差、} \rho: \text{淡水密度、} |Q_{L1}|, |Q_{L2}|: \text{上・下両層の流量、} h_1: \text{塩水面より陸側にとつた } x \text{ 軸より第一層くさび面までの深さ、} h_2: \text{上層下端より第二層くさび面までの深さ、} h_{10}: \text{流出部の淡水深、} L_1: \text{第一層での流出部よりのくさび浸入距離、} H_1: \text{第一層の } x \text{ 軸下端の厚さである。つぎに、淡水と塩水の水位差 } \Delta h \text{ が大きくなると塩水くさびは第二層にのみに形成されることになるが、その場合のくさび形状は、} h_{10} = H_1 + h_{20} \text{ (ここで、} h_{20} \text{ は第一帯水層下端からの流出点での淡水深である) ととつて、式 (4) になり、} h_{20} \text{ は式 (5) になる。また、流量は、Dupuit-Horchheimer の式より、式 (6) より決まり、} Q_L = Q_{L1} = Q_{L2} \text{ が成り立つ。ここで、} Q_L: \text{十分陸側での区間 } \ell \text{ での流量、} H_2: \text{下層の厚さ、} \zeta_2: \text{全くさび長での } x \text{ 軸より自由表面までの高さである。}$$

$$k_1 \varepsilon H_1 (h_2 - h_{20}) + \frac{k_2}{2} \varepsilon (h_2^2 - h_{20}^2) = |Q_{L2}| x, \quad (4) \quad \frac{(H_1 + h_{20}) (k_1 H_1 + k_2 h_{20})^3}{(H_1^2 + 2 k_1 / k_2 \cdot H_1 h_{20} + h_{20}^2)} = \frac{k_1 \varepsilon + k_2}{2 \varepsilon^2} |Q_{L2}|^2, \quad (5)$$

$$Q_L = k_1 \frac{(H_1 + \Delta h)^2 - (H_1 - \zeta_{20})^2}{2 \ell} + k_2 H_2 \frac{(\Delta h - \zeta_{20})}{\ell}, \quad (6)$$

1-2: 上・下帯水層境界に不透水層のある場合  
この場合は現象的に、上・下層を独立に考えて上層では式 (1) で  $k_1 / k_2 = k_1$  において、また、下層では Rumer-Harleman の式<sup>2)</sup> の式

$$h_2 = \left\{ 2 \frac{|Q_{L2}|}{\varepsilon k_2} x + 0.55 \left( \frac{|Q_{L2}|^2}{\varepsilon k_2} \right)^{\frac{1}{2}} \right\}, \quad (7)$$

が適用できるものと考えられる。この考え方は一応実験的に検証される。

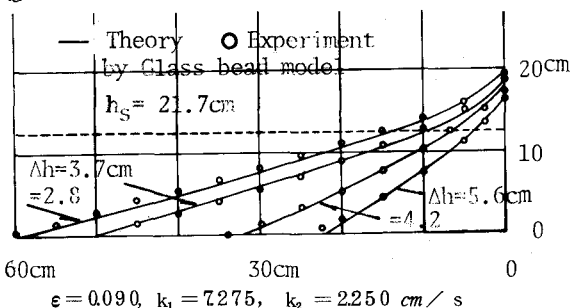


図-1 上・下帯水層境界で流れのある場合の塩水くさび

## 2 傾斜面での塩水くさび

水平均質帯水層で淡水流出部が傾斜している場合（写真－2 参照）、塩水くさび先端の鉛直上方海水面延長線に x 軸原点をとり、運動・連続方程式を立て、Ghyben-Herzberg の条件より解き、x 軸上自由表面の高さ  $\zeta$ 、x 軸よりくさびまでの鉛直距離  $h$  がともに 0 となる仮想原点を  $x=L$  にとると、くさび形状は、

$$Q(L-x) = \frac{k}{2} \epsilon (1+\epsilon) h^2, \quad (8)$$

となり、 $L = k\epsilon(\epsilon+1)h_s^2/2Q$  で決まる。ここで、 $h_s$ ；海水深である。さらに、流量  $Q$  は、

$$Q = \frac{k}{2\ell} (\Delta h + \zeta_0 + 2hs) (\Delta h - \zeta_0), \quad (9)$$

である。ここで、 $\zeta_0$ ；x 軸原点上の自由表面までの高さ、 $k$ ；透水係数である。つぎに、x 軸と斜面の交点から斜面とくさびの交点までの水平距離  $\ell_h$  と x 軸と斜面交点からくさび先端までの距離  $x_0$  の関係は、

$$\left(\frac{\ell_h}{x_0}\right) = \frac{-1 + \sqrt{1 + 2k/Q \cdot \epsilon(1+\epsilon) \tan^2 \alpha x_0 \{ (L/x_0) - 1 \}}}{k/Q \cdot \epsilon(1+\epsilon) \tan^2 \alpha x_0} \quad \dots\dots\dots (10)$$

となる。ここで、 $\alpha$ ；x 軸と斜面の角である。

## 3 実験と理論の比較

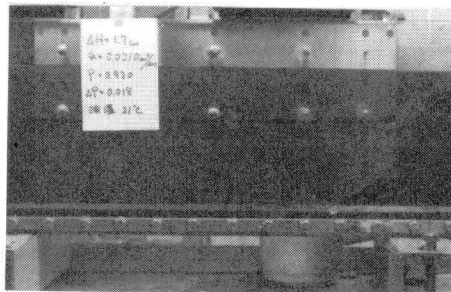
実験は、長さ 135 cm、高さ 35 cm（有効長さ 60 cm、厚さ 2 mm）のヘル・ショウモデルと同じく有効長さ 70 cm、厚さ 1 cm にガラス球をつめたガラス球モデルを併用した。ヘル・ショウモデルは比重  $\gamma = 0.92$  の油とベンガラ微粉末入  $\gamma = 0.936 \sim 0.940$  の油を用い、ガラス球モデルでは、平均径 1.7 mm、2.48 mm のガラス球を充填し、防錆剤入り淡水と  $\gamma = 1.09$  の着色砂糖水を用いた。塩水と淡水水位差を変えてそれぞれ数十種の実験を行い、写真観測も行った。

写真－1 は不透水層をもつヘル・ショウ実測であり、写真－2 は斜面のガラス球モデルの実験である。実験と理論を比較したもの数例が図－1～3 に示されている。それぞれの実験条件は図中に示された通りであり、実験と理論はかなりの精度で一致していることが判かる。

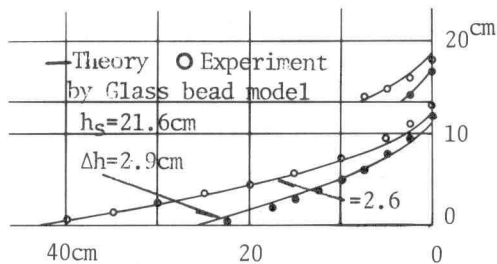
結果的に、二層帯水層の塩水くさびについては、このような解析法、考え方が妥当であり、斜面での塩水くさびについてもこういった近似的解析法が使えるものとする。

## 参考文献

- 1) 佐藤邦明；地下密度流の浸透ならびに拡散現象に関する水工学的研究、文部省科研、試験(1)、昭和 50.3
- 2) Rumer, R.R. & D.R.F. Harleman; Intruded Salt-Water Wedge in Porous Media. Proc. ASCE. Vol. 89

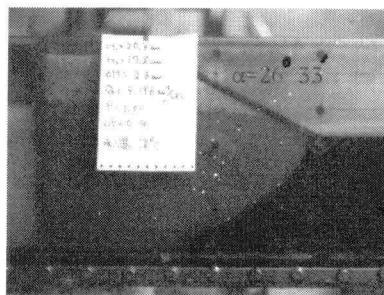


写真－1 不透水層をもつ場合の塩水くさび

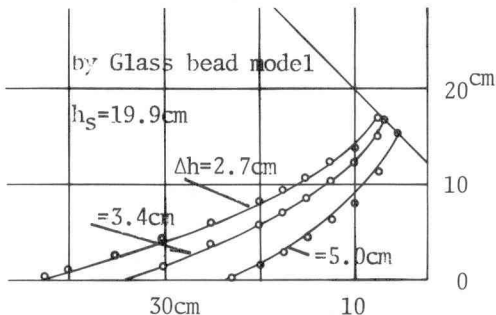


$\epsilon = 0.09$ ,  $k_1 = 5.520$ ,  $k_2 = 5.820 \text{ cm/sec}$

図－2 不透水層をもつ場合の理論と実験



写真－2 傾面での塩水くさび



$\alpha = 45^\circ$ ,  $k = 6.440 \text{ cm/s}$ ,  $\epsilon = 0.090$

図－3 傾面での塩水くさびの理論と実験