

CS 86

海面上昇に伴う円筒型島での淡水の限界揚水量について

大成建設(株)技術研究所 正会員 勝井秀博

東京大学工学部土木工学科 正会員 磯部雅彦

1. はじめに

地球の温暖化による海面上昇量は、西暦2100年までに、約65cmに達すると見積もられている。海面上昇に伴う沿岸のインフラ施設への影響に関しては、土木学会海岸工学委員会の地球環境問題小委員会がその概要をまとめている¹⁾。本研究は、その中で、水不足が問題となる離島の井戸の塩分汚染に焦点を当てたものである。井戸と塩害の関係の研究は、歴史が古く、既に、いくつかの成書^{2,3)}にまとめられている。しかし、海面の上昇を考慮した研究は、潮汐の影響を論じた岸⁴⁾やNielsen⁵⁾、2次元海岸モデルにおける浅枝⁶⁾のほかは少ない。ここでは円筒型島を対象に、海面上昇と島の中心部の井戸における揚水問題との関係を、3次元軸対称問題として理論的に検討した。

2. 理論

検討に用いる基礎理論は、Strack⁷⁾にならい、塩水くさびの運動と浸透層内の淡水の鉛直運動は無視し、静水圧近似を仮定する。図-1に示すように、円筒型島(半径: a (m))の中心部にある井戸(半径: r_w (m))より、 Q_w (m^3/s)の揚水を行う。海面から不透水層までの厚さ: H_s (m)、島の地盤高: H_g (m)、透水係数: k (m/s)、降雨量: q_R' (m/s)、中心から r の距離で海面から塩水くさび面までの深さ: h_s 、淡水の高さ: h_f 、塩水くさびの先端の距離: r_t とし、淡・塩2層となる淡水の領域をI、淡水のみの領域をIIとする。また、海水密度: ρ_s 、淡水密度: ρ_f とし、 $s=\rho_s/\rho_f=1.025$ 、 $\alpha=s/(s-1)=41$ とおく。

(1) 領域I ($r_t \leq r \leq a$): 淡水と海水の境界面での圧力の連続性(Ghyben-Herzbergの仮定)より、

$$\rho_s h_s = \rho_f (h_f + h_s) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$h_f + h_s = h_s / (s-1) = \alpha h_f \quad \dots\dots\dots (2)$$

流出係数 f とすると、降雨量 q_R' のうち、地下に浸透して淡水層に供給される流量: q_R ($m^3/m^2/s$)は、

$$q_R = (1-f)q_R' \quad \dots\dots\dots (3)$$

となる。Darcy則と流量の連続性より、

$$-k(dh_f/dr) \cdot (h_f + h_s) \cdot 2\pi r = q_R \pi r^2 \quad \dots\dots\dots (4)$$

(4)式を r で積分して、 $r=a$ で $h_f=0$ の条件を入れると

$$\frac{1}{2} \alpha h_f^2 = \frac{1}{4} (q_R/k) (a^2 - r^2) + \frac{1}{2} (Q_w/\pi/k) \ln(r/a) \quad (5)$$

塩水くさび先端の位置 r_t は(5)式で $h_s=H_s$ 、すなわち $h_f=(s-1)H_s$ 、と置いて得られる。

$$\frac{1}{2} s(s-1)H_s^2 = \frac{1}{4} (q_R/k) (a^2 - r_t^2) + \frac{1}{2} (Q_w/\pi/k) \ln(r_t/a) \quad \dots\dots\dots (6)$$

(2) 領域II ($0 < r \leq r_t$): 領域IIでは、(4)式中で $h_s=H_s$ に固定される。(4)式を同様に積分し、 $r=r_t$ で $h_f=(s-1)H_s$ の条件と(6)式より、(7)式が得られる。

$$\frac{1}{2} (h_f + H_s)^2 - \frac{1}{2} s H_s^2 = \frac{1}{4} (q_R/k) (a^2 - r^2) + \frac{1}{2} (Q_w/\pi/k) \ln(r/a) \quad \dots\dots\dots (7)$$

(3) 最大淡水面高さ: 最大淡水面高さ h_{fmax} は、 $dh_f/dr=0$ となる条件より、 $r=r_m=(Q_w/\pi/q_R)^{1/2}$ にて、

$$\text{領域I: } \alpha h_{fmax}^2 = \frac{1}{2} (q_R/k) (a^2 - r_m^2)$$

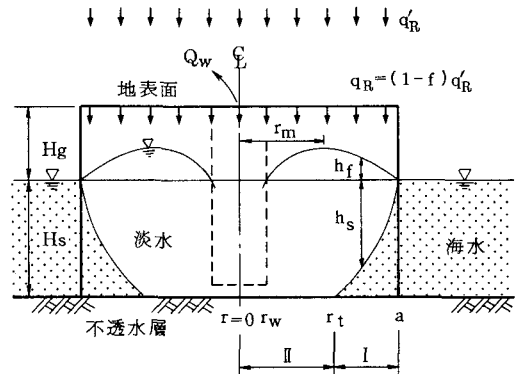
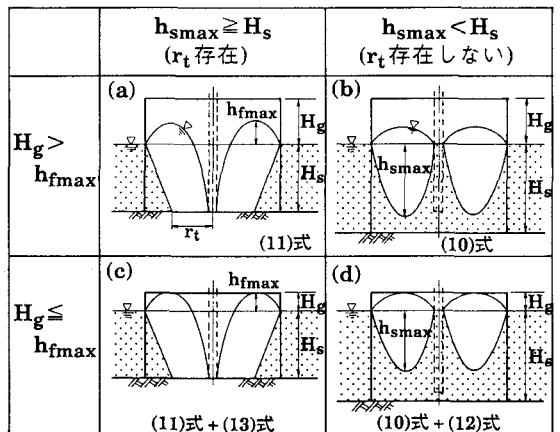


図-1 記号の定義図

図-2 Q_{cr} の算定に用いる水面形の分類

$$+ (Q_w / \pi / k) \ln (r_m / a) \quad \cdots \cdots (8)$$

$$\text{領域II: } (h_{\max} + H_g)^2 = \frac{1}{2} (q_R / k) (a^2 - r_m^2)$$

$$+ (Q_w / \pi / k) \ln (r_m / a) + s H_g^2 \quad \cdots (9)$$

(4) 限界揚水量: a) r_t が存在しない時; すなわち、塩水くさびが島の中央まで到達する場合、井戸部で $h_t > 0$ でなければならない。(5)式より限界揚水量 Q_{cr} は、

$$Q_{cr} / (\pi k a^2) = \frac{1}{2} (q_R / k) \{1 - (r_w / a)^2\} / \ln (r_w / a)^{-1} \quad \cdots (10)$$

b) r_t が存在する時; すなわち、塩水くさびが井戸部まで到達しない時は、(6)式が解をもつことと、淡水面($h_t + H_g$)が不透水層に達しないことより、

$$Q_{cr} / (\pi k a^2) = \left[\frac{1}{2} (q_R / k) \{1 - (r_w / a)^2\} + s (H_g / a)^2 \right] / \ln (r_w / a)^{-1} \quad \cdots (11)$$

(5) 地盤高の考慮: 計算上の最大淡水面高さ $h_{\max}$ が、地盤高さ H_g より高いと、 q_R が減少し余水は地盤表層を流れて流失する(実質的な f の増加)。この場合は、(8), (9)式にて $h_{\max} = H_g$ とおき、次の(12), (13)式と(10)式または(11)式を連立させて Q_{cr} を求める。

$$\alpha (H_g / a)^2 = \frac{1}{2} (q_R / k) \{1 - (r_m / a)^2\} + Q_w / (\pi k a^2) \ln (r_m / a) \quad \cdots (12)$$

$$\{(H_g + H_s) / a\}^2 = \frac{1}{2} (q_R / k) \{1 - (r_m / a)^2\}$$

$$+ Q_w / (\pi k a^2) \ln (r_m / a) + s (H_g / a)^2 \quad \cdots (13)$$

以上、限界揚水量の算定に用いる式と水面形のパターンを、 r_t が存在する時と、しない時、 H_g が十分に高い時と低い時の4通りに分けて図-2に示す。図より定性的ではあるが、塩水が井戸部に接近する(b),(d)のパターンが、限界揚水量にとって厳しくなることが分かる。

3. 計算と考察

図-3に(6)式が解 r_t をもつか否かの判定グラフを示す。 $Q_w / (\pi k a^2)$ が与えられると、曲線の左側で解が存在し、図-1のパターンとなる。海面上昇により $H_g / a > H_{scr} / a$ となると、図-2の(b),(d)のパターンに移行する。

r_t が存在する場合、塩水くさび先端の位置 r_t/a は(6)式より図-4のようなになる($q_R/k=10^{-2}$)。 H_g/a が増大すると r_t/a が減少し、先端が島の中心の井戸部に近付くが、 H_g/a がある程度以上になると、図-2の(b),(d)のパターンに移行する。

限界揚水量は、図-2の中で地盤高の影響を受けるパターン(d)が厳しい。図-5は、その時の限界揚水量 Q_{cr} を示す。 H_g/a が低くなると、限界揚水量 Q_{cr} は減少するが、井戸の半径 r_w/a が大きくなると Q_{cr} は増大する。このことは、井戸を中心部に集中させないで、ある半径上に分布させた方が、塩水の影響を受けず、大きい揚水量が得られることを示す。 $a=1000\text{m}$, $H_g=2\text{m}$, $r_w=1\text{m}$ の条件で、図より $Q_{cr} / (\pi k a^2) = 3 \times 10^{-5}$ と読める。海面が0.65m上昇すると $Q_{cr} / (\pi k a^2)$ は50%減となり、低海拔の島嶼における、海面上昇の影響が井戸問題でも示されたことになる。

本研究は土木学会海岸工学委員会「地球環境問題研究小委員会」WGの研究成果であることを付記する。

参考文献

- 1) 土木学会(1992): 「海岸工学に関わる地球規模環境問題」に関する調査研究中間報告書, 2) Bear, J. (1979): Hydraulics of Groundwater, McGraw-Hill, 3) 山本莊毅(1983): 新版地下水調査法, 古今書院, 4) 岸洋介ら(1984), Jap. J. Limnol. 45, 1, pp.61-68, 5) Nielsen, P. (1990), Water Resources Res. Vol.26, No.9, pp.2127-2134, 6) 浅枝隆(1992), 文献1) 中, 7) Strack, O.D.L. (1976): Water Resource Res. Vol. 12, No.6, pp.1165-1174

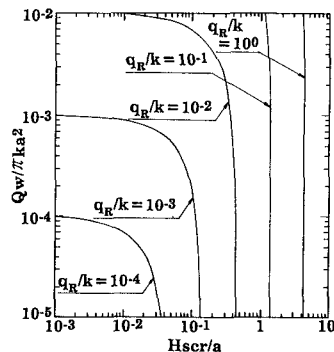


図-3 r_t 存在の判定図

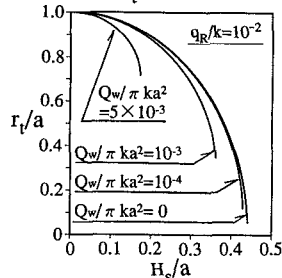


図-4 塩水くさび先端の距離 r_t/a

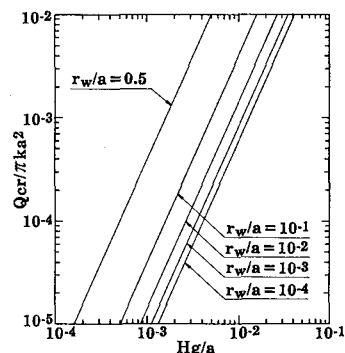


図-5 限界揚水量 $Q_{cr} / (\pi k a^2)$: パターン(d)