

二次元モデルによる海岸帯水層における被圧地下水の挙動について

愛媛大学工学部 正 員 柿沼忠男
愛媛大学工学部 正 員 井内国光
(株)建設技術研究所 正 員 O 銅金裕司

1. まえがき 昨年度の学会において著者らが海岸帯水層における被圧地下水に関する基礎方程式に種々の近似を用いて近似方程式を誘導し、その数値解析結果と基礎方程式による解析結果と比較検討した結果、近似方程式による解法が、妥当性を有し、実用的であることを得た。前報では、一次元モデルであったが、より一般的な二次元モデルを議論する必要がある。そこで、ガラーキン有限要素法を用いて二次元モデルを定式化し、現地への適用例を示した後、淡水・海水境界面の挙動について考察する。

2. 近似方程式のガラーキン有限要素法による定式化
近似方程式：図-1の、被圧地下水の断面断面図を示し、淡水・海水境界面が存在する領域を淡水化域、淡水のみが存在する領域を淡水域と呼ぶ。前報で示した、おける水位 η^{eff} および無次元化した淡水層厚 G の近似方程式は、式(1)および(2)で示される。

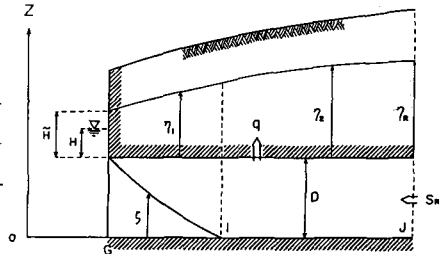


図-1 被圧地下水の断面断面図

$$S^* \frac{\partial \eta^{eff}}{\partial t} = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \eta^{eff} - Q^* \quad (1)$$

$$G^* \frac{\partial G}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[G \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \eta^{eff} - \frac{(1-G)^2}{2} \right\} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[G \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \eta^{eff} - \frac{(1-G)^2}{2} \right\} \right] \quad (2)$$

ここで、 $S^* = S/kD$, $Q^* = Q/p/(p_2 - p_1)kD$, $G^* = SG/p/(p_2 - p_1)kD$, 淡水域での $\eta^{eff} = E_2 - \frac{1}{2}$, $E_2 = (\eta_2 - \bar{H})p/(p_2 - p_1)D$, 淡水化域での $G = \zeta/D$, $\eta^{eff} = E_1 + \frac{1}{2}G^2 - \frac{1}{2}$, $E_1 = (\eta_1 - \bar{H})p/(p_2 - p_1)D$, S : 貯留係数, σ : 有効間隙率, k : 透水係数, Q : 揚水量, D : 帯水層厚, $\bar{H}$: 海面上の水頭, η_1, η_2 : 淡水化域, 淡水域の水頭, p_1, p_2 : 淡水, 海水の密度である。

境界条件：上述した被圧地下水の淡水化現象に関する二次元非定常問題は、まず最初に η^{eff} に関する式(1)、次に G に関する式(2)を平面領域における境界条件の下で解くことに着手する。図-2の、 η^{eff} および G に関する境界条件を示したものであり、図中 DC は地下水水入口、 AB は海との境界、 AD および BC は不透水壁であり、 $S_R^* = SG_R/p/(p_2 - p_1)kD^2$ (S_R : 単位長さあたりの流入量), $V^* = (\eta_2 - \bar{H})p/(p_2 - p_1)D - \frac{1}{2}(\eta_2 - \bar{H})$ (境界の水頭)である。

ガラーキン有限要素法による定式化：式(1)および(2)をガラーキン有限要素法により定式化する。 η^{eff} および G を離散化し

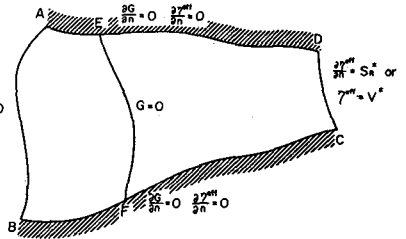


図-2 境界条件

$$\eta^{eff} = \sum_{i=1}^n N_i(x, y) \phi_i(t) \quad (3) \quad G = \sum_{i=1}^n N_i(x, y) \phi_i(t) \quad (4)$$

$$\text{したがって式(1)および(2)は, } [H] \{\phi\} + [P] \frac{\partial \{\phi\}}{\partial t} + \{F\} = 0 \quad (5) \quad [H] \{\phi\} + [P] \frac{\partial \{\phi\}}{\partial t} + \{F\} = 0 \quad (6)$$

となる。ここで、 $H_{ij} = \int_{\Omega} \left(\frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} \right) dx dy$, $H'_{ij} = \int_{\Omega} G(1-G) \left(\frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} \right) dx dy$, $P_{ij} = \int_{\Omega} N_i S^* N_j dx dy$, $P'_{ij} = \int_{\Omega} N_i G^* N_j dx dy$, $F_i = \int_{\Omega} N_i Q^* dx dy - \int_{\Omega} N_i S_R^* ds$, $F'_i = \int_{\Omega} N_i G \left(\frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_i}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_i}{\partial y} \right) dx dy$, Ω および Ω' は η^{eff} および G の解析領域, N_i, N'_i は形関数である。有限要素法を用いた。

3. 現地への適用 ここでは、二次元モデルを徳島県那賀川河口部へ適用している。図-3の、帯水層モデル

おとすの分割である。帯水層厚 25m, 透水係数 1.11 cm/sec, 貯留係数 0.01, 有効間隙率 0.3, また, 地下水流入量おとすの総揚水量が最初に おとすの 365000 m³/day おとすの 35000 m³/day であるが, 次の瞬間に おとすの 369800 m³/day おとすの 360000 m³/day に変化し, 以後この状態を維持する非定常解を示した。図-4 おとすの 5m, 0日 おとすの 2年後の淡水水境界面と地下水位を示すものである。境界面が内陸部へ 200~250m 侵入している。図-6 おとすの 7m, 淡水水境界面の足の位置を示したもので, 観測結果とよく一致している。このことから, 二次元モデルで, 現地の帯水化現象をよく説明できると考えられる。

4. 種々の揚水型式に対する非定常解 まず, 前報の一次元モデルと比較して, 二次元モデルによる解析結果と一次元モデルのそれとを一致を示した。

ついで, 揚水地点の分布型式として 10通りあり, それぞれの淡水水境界面の瞬間的変動を求めた。用いた帯水層モデルは前報と同一で, 豊後川河口をモデルにしたものである。長さ 2500m, 幅 1000m, 厚さ 20m の直方体である。貯留係数, 透水係数 おとすの有効間隙率は, 0.01, 1.0 cm/sec, 0.3 とした。図-8 の一例を示したものである。最初に総揚水量が 9600 m³/day であるが, 次の瞬間に 14000 m³/day に変動し, 以後この状態を維持する場合の境界面の足の位置を示し, 図中の黒丸が揚水地点である。この図を見れば, 境界面の足は 0日でも直線型であったが, 300日以内陸部へ凸型を示し始め, 600~1200日を見るに揚水地点に近づくにつれて移動速度が速くなるが, 通過するに遅くなる傾向がある。図-9 おとすの 10m, 海岸近くで揚水した場合の初期状態 おとすの 300日での境界面を示したものである。総揚水量が増えた場合である。この図を見れば, 初期状態に比べて 300日での Y 方向現象が顕著に表れている。

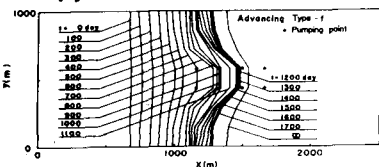


図-8 境界面の足の移動

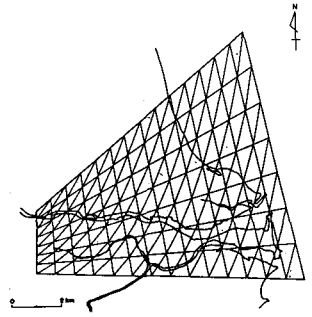


図-9 帯水層モデル

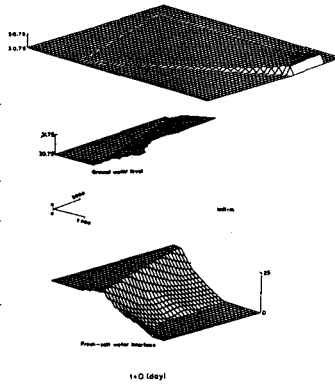


図-4 境界面の地下水水位 (0日)

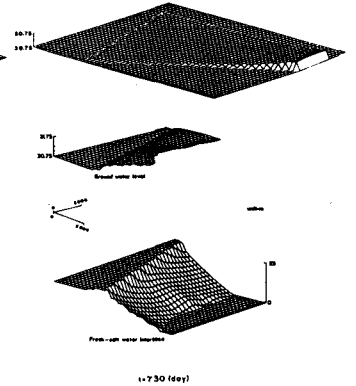


図-5 境界面の地下水水位 (730日)

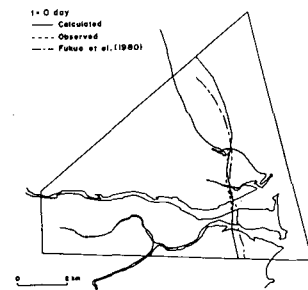


図-6 境界面の足 (0日)

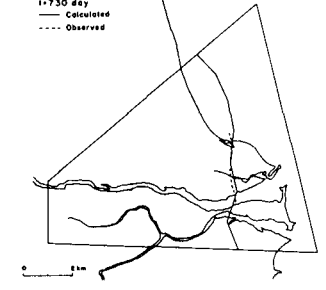


図-7 境界面の足 (730日)

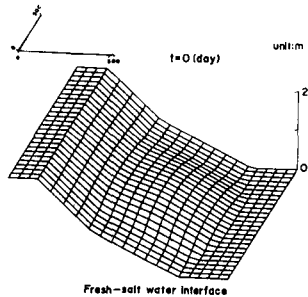


図-9 境界面 (0日)

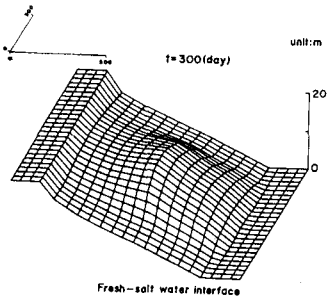


図-10 境界面 (300日)