

孤島における淡塩地下水の検討

Study on fresh and salt groundwater movement in an island

(財)電力中央研究所 正員 ○田 中 伸 和

(財)電力中央研究所 正員 安 芸 周 一

1. まえがき

海上の孤島や海岸付近での地盤内では、雨水の浸透による淡水が海側から浸入した海水上に滞水しているものと思われる。しかし、この滞水量あるいは淡塩水の境界面の位置は雨水の表面流出の残余分として地表面から地下水へ涵養される雨水浸透量、当該する地盤のもつ透水性、地下水面形状、および当該地点の地形に大きく依存するものと考えられる。¹⁾

とくに、海上の孤島等のように海岸線から急に地表面が立ち上っているような地形においては、地下水水頭が高く、地下水面の勾配も急峻である。そのため、淡水が浸入塩水を強く海側へ押しもどしており、いわゆる静水圧近似から誘導される Ghyben-Herzberg の条件で求まる淡塩境界面位置を示さないものと思われる。^{2),3)}

今回、当所では瀬戸内海の一孤島において、地下水位分布と塩分濃度分布についてのボーリング調査、ならびに透水試験を実施した。ここでは、これらの調査結果の一例を示すとともに、調査結果の検証のために当該地形を考慮した数値シミュレーションにより雨水浸透量や淡塩境界面位置の推定を行なったので、それらについて述べるものである。

2. 実測結果

実測を施した孤島は瀬戸内海に位置し、長さ約3 km、幅約1 km、最大標高約150 mのものである。この孤島における地質および地下水の調査のため、昭和53年8月から翌年の4月まで計13個のボーリング調査を実施した。その結果得られた主な調査結果を以下に簡単に述べる。

(1) 地下水位

孤島内の地下水位分布を把握するために、ボーリング孔内での水位を測定した。測定は

- ① 毎日掘進終了時に孔内に水を満たして放置し、翌朝に降下した孔内水位を測る。
- ② 掘進終了時にロッドを引抜いたまま放置し、翌朝に回復した孔内水位を測る。

といった2方法によって行なった。

まず、孔内水位の降下および回復状態の一例を図-1に示す。その結果、これら2方法により測定された孔内水位はほぼ同じであり、測定水位は安定した孔内水位であることが認められた。

また、調査期間(昭和53年9月~昭和54年3月)中に測定された孔内水位の日変化を図-2に示す。図には昭和53年10月までしか示さなかったが、それ以後はほぼ一定した水位を示したので省略した。

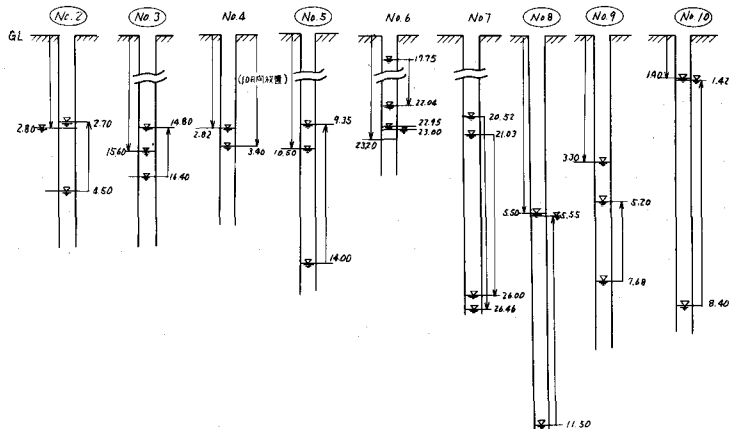


図-1 ボーリング孔内自然水位およびその回復状況
(○印は水位の低下および上昇を比較したもの)

なお、ボーリング掘進中での孔内水位と降雨量との関係を求めたが、降雨による顕著な孔内水位の上昇は観測されなかった。

以上の調査結果より当該する孤島のほぼ中央部を横断する方向における地下水位の分布を示したものが図-3である。図に示すように、この孤島における地下水位の分布はほぼ地表面に追いついた分布を示すことが認められ、最大の地下水位は海面上約120mであった。

(2) 透水係数

シングルバッカー法による透水試験で得られた注入圧力pと注入量qの値よりボーリング孔周辺の透水係数を求め、それらの代表的な分布列を図-4に示す。なお、透水係数kは次式により算出した。

$$k = \frac{\ln(L/r)}{2 \cdot \pi \cdot L} \cdot \frac{q}{p}$$

ここに、

- k : 透水係数 (cm/sec)
- L : 透水区間長 (cm)
- r : ボーリング孔半径 (cm)
- q : 注入量 (cm³/sec)
- p : 注入圧力水頭 (cm)

である。

その結果、地表面から40～50mの間では透水係数の値が大きく、それ以深では10⁻⁶ cm/secのオーダーであることが分かる。なお、図-4中におけるNo.1ボーリング孔は海岸線から約10mで標高約5mの地点であり、地表面から約227mまで掘進を行った。また、No.4～7のボーリング孔は図-3に示す位置でのものであり、深さはそれぞれ161, 191, 205, 212mまでである。

(3) 塩分濃度

地下水中の塩分濃度を推定するために、各ボーリング孔内水の電気伝導度の測定を行なった。その結果、ボーリング孔内水の電気伝導度は100～500 μS/cmの値を示した。これらのうち、海岸線にもっとも近いNo.1ボーリング孔内での塩分濃度の分布列を図-5に示した。なお、比較のため、周辺での池の溜り水、沢の水、および海水の電気伝導度を求めた結果によれば、それぞれ87.5, 85.0, 24,000 μS/cmであり、またそれぞれの水温は11.0, 12.4, 18.6℃であった。さらにバケツ一杯の池の水にコップ一杯の海水を注ぎ込んだ場合には、880 μS/cm, 10.8℃であった。なお、気温は16.4℃、時間は昭和53年11月中旬の午前9時頃である。

そのため、海岸線にもっとも近いNo.1ボーリング孔内では、海水面下約230mに至っても海水の存在が認められないことが確かめられた。

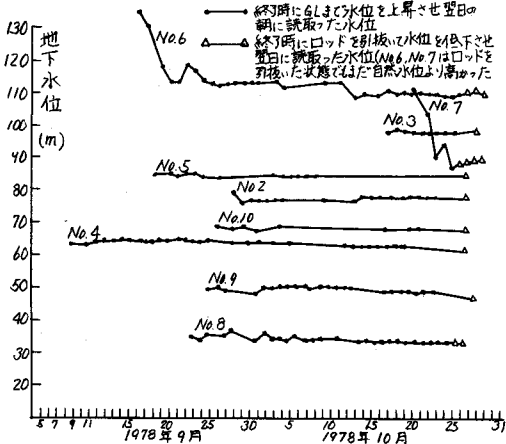


図-2 ボーリング孔内自然水位の掘進による変化

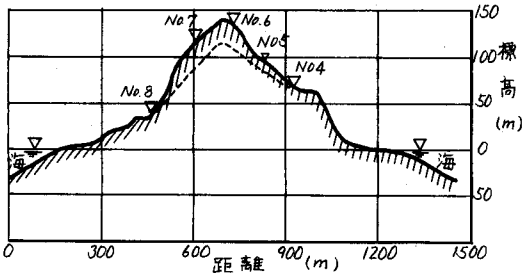


図-3 ボーリング孔内自然水位の分布 (1978年10月29日現在)

3. 地下水流の解析

(1) 解析法

地下水流の解析においては、水平および鉛直方向の流速成分を加味した鉛直2次元現象として取り扱った。基本式はダルシー則と質量保存則にもとづき浸透層と地下水の圧縮性を考慮して誘導される方程式⁴⁾であり、地下水面上的の水粒子の運動学的条件にもとづく水面保持式と連立させて解析することにより、地盤内での地下水の挙動と地下水位の変化を求めることができる。なお、解析は差分法による数値シミュレーション⁵⁾により行ない、それらについては前報を参照いただきたい。

(2) 雨水浸透量の評価

まず、当該する孤島において地表面から地下水へ涵養される雨水浸透量を評価するため、地形を考慮した鉛直断面（図-3）に対して雨水浸透量をパラメータとして地下水位分布ならびに地下水流動を計算し、実測された地下水位分布（図-3）との比較を行なった。

なお、簡単のため淡塩水の密度効果を無視した計算⁶⁾を行なった。また、差分分割ならびに地形は図-6に示す通りである。

得られた地下水位分布の結果を示すと図-7のようになった。その結果、もっとも実測地下水位分布と良好な一致が認められたのは雨水浸透量として約0.4 mm/dayの場合であった。なお、この値は当該地点周辺での年平均雨量は約1,600～1,700 mmであり、地盤の透水係数も比較的小さいのでほぼ妥当な値と思われる。また、雨水浸透量0.4 mm/day、空隙率5%、透水係数 10^{-6} cm/secの場合の地下水流動の計算結果を図-8に示す。

なお、雨水浸透量の分布を q_{si} 、地盤内での地下水発生率を Q_{ij} とすれば、

$$Q_{ij} = \frac{2 \cdot q_{si}}{4\eta_2 + 4z}$$

が成り立つものとした。ここで、 i, j は図-9に示すようにそれぞれ x, y 軸方向の格子軸、 $4\eta_2, 4z$ はそれぞれ (i, j) 格子点より地下水面および $(i, j-1)$ 格子点までの距離である。

なお、地下水位の計算結果は実測水位にくらべかなり平坦な形状を示しているが、これは雨水浸透量を場所的に一様なものとして与えたためと思われる。実際には、図-4の透水係数の分布からまわ

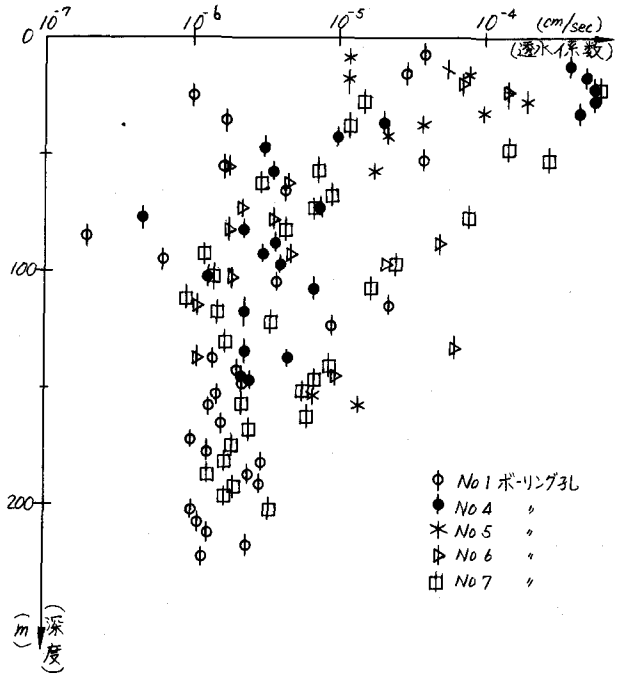


図-4 透水試験より求めた透水係数の深度分布

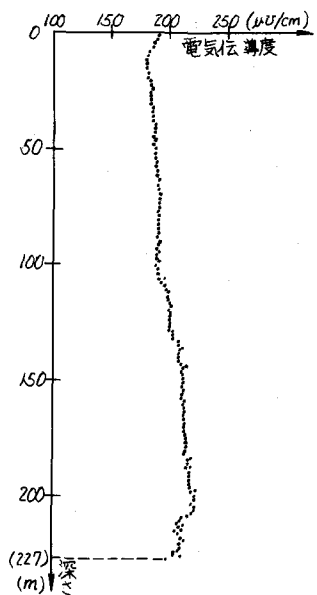


図-5 ボーリング孔内水の電気伝導度分布の1例（No. 1ボーリング孔）

かるように、地表面近くは比較的透水係数が大きく、地表面から地下水面までの距離が浅い程、中間流出として多量の雨水が湧出し地下水への涵養量がすくなくなるものと思われる。そのため、雨水の浸透量は地下水面までの深さにも関係し、場所的に様と与え難いものとなり、今後さらに検討が必要であろう。

(3) 淡塩境界面位置の推定

海上の孤島の地盤内では、地表面から雨水の浸透による淡水の補給を受けるため、図-10に示すように海水の上部に淡水が存在し、地表や海底から淡水が湧出しているものと思われる。

このような地下水場内の淡塩境界面位置を推定するに当っては、古くから静水圧近似にもとづくGhyben-Herzberg条件が用いられてきたが、地下水位が高くなる場合には、淡塩境界面に作用する動水圧が強くなり、このような条件が適用しがたいものと思われる。

今回の塩分濃度分布の実測においても、海岸線から約10mで標高が約5mの位置での $\phi 1$ ボーリング孔内でも図-5に示すように地表面下227mまで海水の存在が認められなかった。

そのため、このことの確認のため淡塩地下密度流の数値解析を実施した。計算に用いた地形は当該の孤島の $\phi 1$ ボーリング孔を含む横断面を想定し、島の長手方向への地下水流動は小さく無視できるものとした。また、簡単のため解析は山頂部から $\phi 1$ ボーリング孔側のみに限った。とくに、淡塩境界面の変化を詳細に取り扱うために、境界面を含む部分に細かく格子分割を施した。

得られた結果のうち、前項までの雨水浸透量や透水係数の評価値に近い 0.5 mm/day 、 10^{-6} cm/sec のものにおいて、淡塩境界面位置の変化、地盤内のビエゾ水頭の分布、および地下水流動をそれぞれ図-11～13に示した。

なお、透水係数や空隙率は全領域において等方的と仮定し、雨水の浸透量も一定とみなした。また、地下

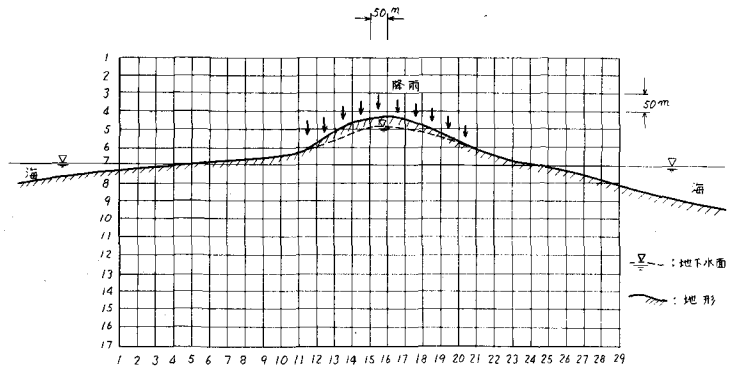


図-6 雨水浸透量計算に用いた地形と格子分割

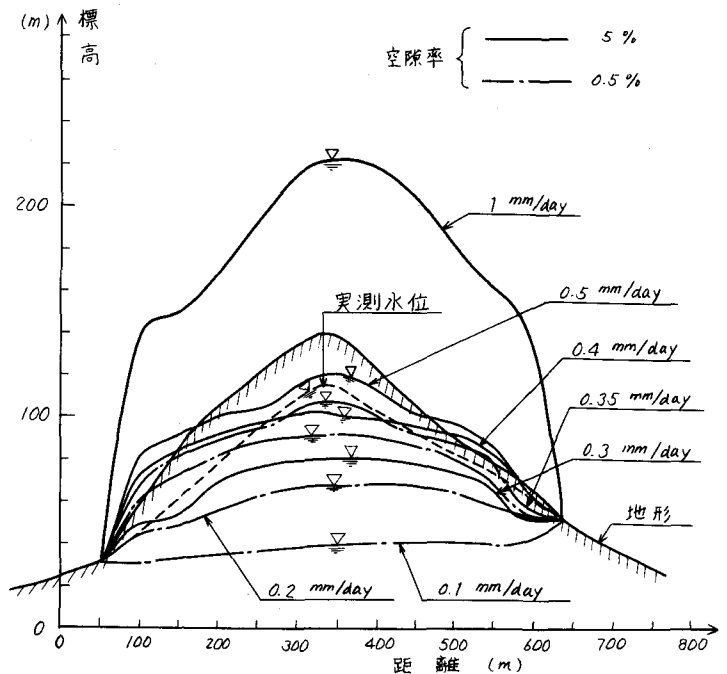


図-7 計算より求めた地下水位分布と雨水浸透量との関係

水位分布は実測値に近い分布を与え、水面を固定しその変動は解析していない。さらに、初期条件としては、地下水が静止している場合とし、淡塩境界界面形はGhyben-Herzben条件により与えた。

その結果、淡塩境界面の位置はGhyben-Herzberg条件で示される位置よりかなり低下することが認められた。しかし、今回の計算は定常状態で行なわなかったが、当該する孤島ではかなり高い地下水位をもっているため、かなり淡塩境界が海側へ押し込まれているものと思われる。

4. まとめと今後の方針

以上の結果、本解析法を実測値と比較することにより、その妥当性の検証を行なうことができ、海上の孤島等の淡塩地下密度場において有効に使用できるものと考えられる。

今後は、このような孤島のように雨水の浸透は伴うが、かなり限られた淡水のみが存在する場所での淡水の使用限界ならびに淡水の揚水に伴う地下水面や淡塩境界面の変化を当該地点の水文量との比較のもとで実施して行きたい。

現在、ここで開発し、実測結果との比較のもとでその妥当性を検証した地下水流の鉛直2次元解析法を従来の準一様流解析法と連結することにより、孤島等のように限られた淡水しか存在しない地下水場内に構造物を設置し、淡水を揚水したために生じる地下水の局所的および広域的な挙動を解明しており、それについては次回以降に発表する予定である。

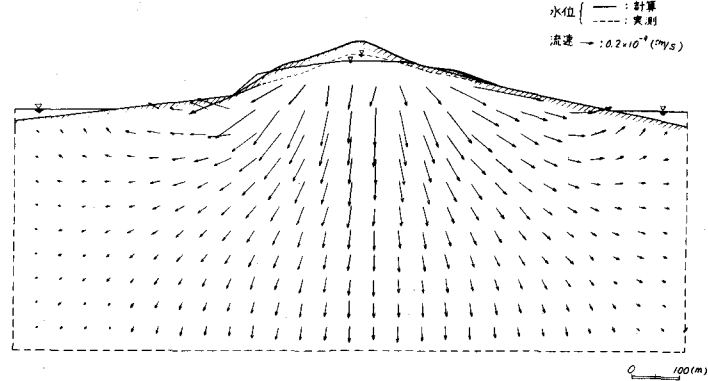


図-8 地下水流動の計算結果(雨水浸透量: 0.4 mm/day 、透水係数: 10^{-6} mm/sec 、空隙率: 5%)

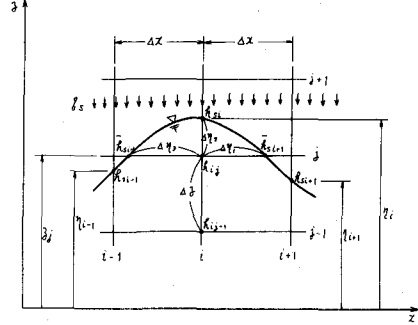


図-9 地下水位近傍での格子分割例

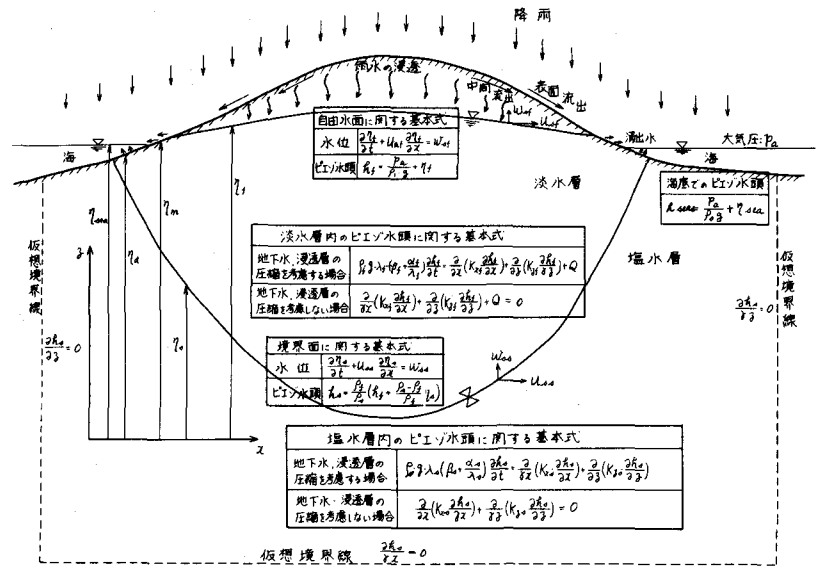


図-10 海上の孤島における地下水場の概要

5. 参考文献

1) Scheidegger, A.E.: The physics of flow through porous media, University of Toronto Press, 1957.

2) Baden-Ghyben, W.: Notes on the probable results of well drilling near Amsterdam (in Dutch), Tijdschrift van het Koninklijk Inst. van Ing., The Hague, 1888.

3) Herzberg, A.: Die Wasserversorgung einiger Nordseebader, J. Gasbeleucht, Wasserversorg, vol. 44, 1901.

4) Jacob, C.E.: Flow of ground water, Engineering Hydraulics, vol. V, edited by H. Ro-use, joho Wiley, 1950.

5) 田中伸和・安芸周一: 淡塩地下密度流の数値シミュレーション, 第34回年次学術講演会, 1979.

6) 田中伸和・安芸周一: 燃料地下タンクの技術開発に関する研究 — 水封式地下貯蔵にともなう周辺地下水変化の検討(その1) —, (財)電力中央研究所 研究報告 379006, 昭和54年7月

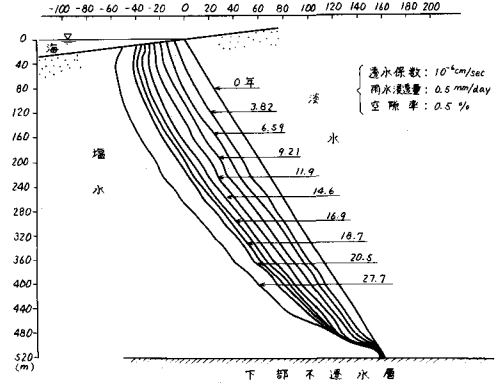


図-11 淡塩境界面位置の経年変化
(0年の位置はGhyben-Herzberg条件による)

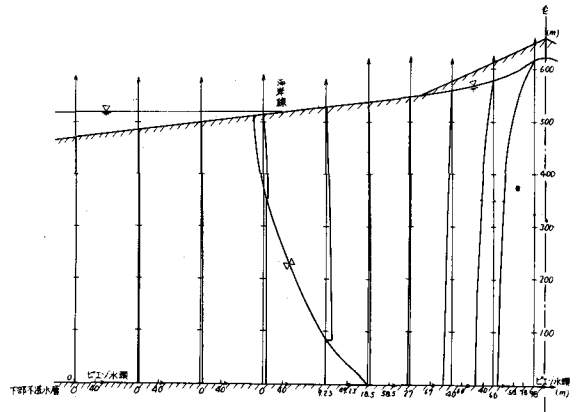


図-12 地盤内のピエズ水頭の分布例(27.7年後)

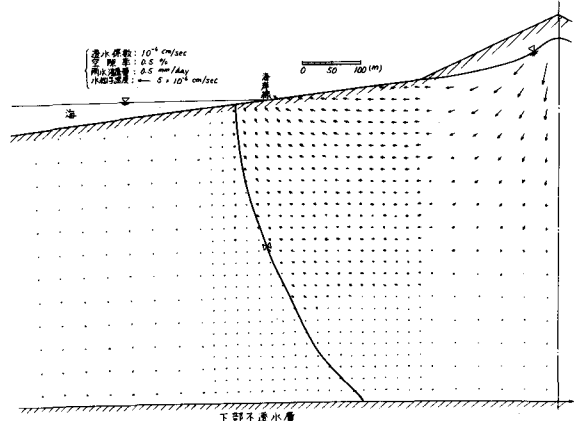


図-13 淡塩水粒子速度の分布例(27.7年後)