

感潮河川内浚渫による地下水塩水化の変化予測

尾 島 勝*・天 羽 誠 二**

1. はじめに

周知の通り近年とくに、いわゆる“地下水塩水化”の程度が進行して地下水利用にも支障をきたす事例が各地で発生し、その被害防止・軽減策の確立が急務となっている。すなわち、海岸部地下水帯への塩分侵入量、分散域の増大現象の多くは、地下水の過剰揚水^{1),2)}や感潮河道部の浚渫による塩水遡上域の拡大などに起因するものと考えられる。

したがって、今後はこのような人為的付加条件の変化に伴う地下水流動機構を把握するとともに塩分侵入の挙動に与える影響度を解明する必要がある^{3),4)}。そこで、本研究では感潮河道部浚渫が周辺部地下水の塩水化現象の変化に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、現地観測を実施するとともに基礎的な砂層モデル実験を行い、浚渫深さ、地下水流動量(揚水量)および護岸矢板の開閉幅などを考慮して現象解析を試みたものである。

2. 現地観測

2.1 現地観測対象域の概況

現地観測対象域⁵⁾は図-1に示すように、徳島県東南部の郡賀川および桑野川の河口域の右岸側の面積約 10 km²の小地域であり、最近、徳島県により富岡港改修計画に基づき、図中の斜線の河道部の浚渫が実施された。当河川流域は平均的には 2000 mm/年～2200 mm/年の降

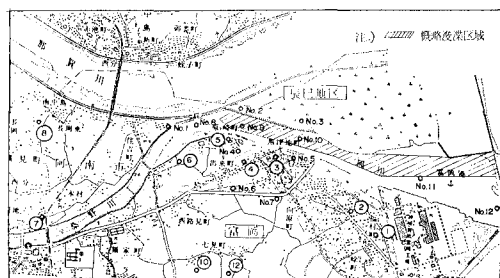


図-1 対象域

雨量を有し、表流水、地下水を含めて利水容量は豊富である。

図中に地下水観測の目的で新たに設置された浅井戸 5 個 (No. 1～No. 5)、深井戸 2 個 (No. 6～No. 7) (昭和 53 年設置)と周辺既設浅井戸および河道内塩分濃度・水位観測点の位置を示した。

観測は毎月 2 回、大潮・小潮時に実施し、対象河川が感潮河川であることを考慮して、1 日 2 回満潮・干潮時に水位および深度 1 m 毎の地下水塩分濃度、河道内塩分濃度を上記の各測点において計測した。

2.2 観測結果

図-2 には、対象域中の既設井戸における塩分濃度の経年変化を示した。この図にみられるように塩水化の程度はまだ軽微であるが、若干濃度値が増加傾向にあり、塩水化域の拡大が危惧される。

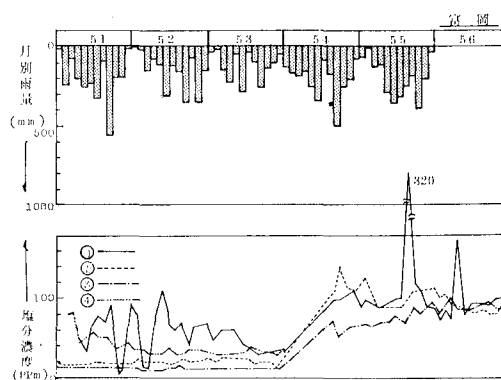


図-2 塩分濃度の経年変化

図-3 には、新設の観測井戸の No. 1 (浅井戸) と No. 6 (深井戸) の塩分濃度分布を示した。年間を通じてほぼ同程度の値を示しているものの夏季と冬季では、地下水かん養量の差異により夏低冬高の傾向が読みとれる。

ここで、河道浚渫の影響を受け易いと考えられる不圧地下水の塩水化特性について、昭和 54 年夏季に実施した一潮汐間連続観測結果より考察する。図-4 にその結果を示した。浅井戸 No. 1 の周辺河川堤防には、矢板等の遮水構造物が存在しないために地下水位と河川水位

* 正会員 工博 徳島大学助教授 工学部土木工学科

** 正会員 四国建設コンサルタント(株)

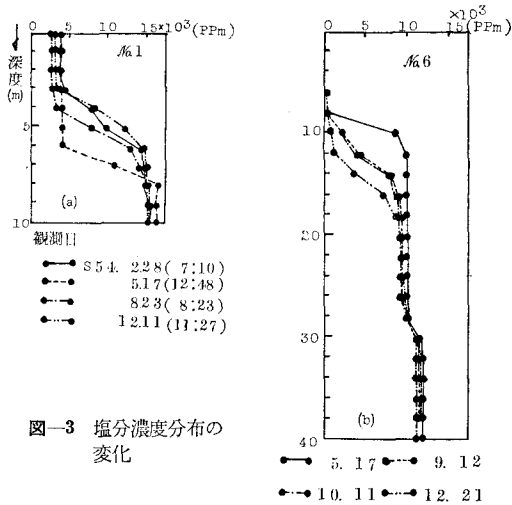


図-3 塩分濃度分布の変化

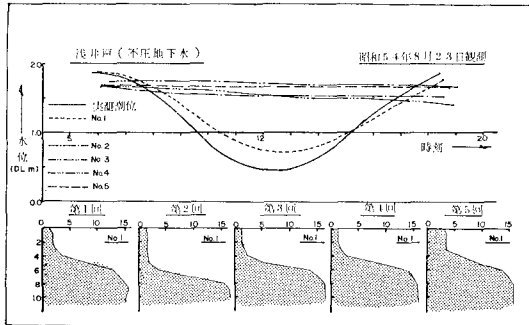


図-4 塩分濃度の時間的变化

は連動しており、変動の相関 ($R_x=0.8$) は非常に高くそれだけ潮位変動に伴う地下水流動が生じていることになる。したがって、塩分の移動・混合が行われていると推定される。このことは水深 4~6m における塩分濃度の時間変化に顕われているが、鉛直分布形状には大きな変化はみられず、ごく限られた水深の範囲で塩分の混合が行われているといえる。すなわち、大略的には塩水と

淡水の混合を無視する模理論を用いてこの塩水界面の挙動を解析してもよいと思われる。

また、対象域の平均的な地下水流動量を推定するために、Tyson-Weber の水収支式を適用して解析した。

その結果の一例を示したものが図-5である。

平均滞水層厚は土質資料より不圧地下水帯は約 12 m、被圧地下水帯は約 10 m であり、それぞれの滞水層の透水係数は 2.01×10^{-3} , 1.41×10^{-2} (m/sec)、貯留係数は 0.1, 4.82×10^{-2} と推定された⁶⁾。

これらの地下水流動量の解析結果を用いて、河道浚渫後の変化予測や遮水構造物の影響等について検討する。

3. 塩水化現象の変化に関する検討

3.1 解析手法の展開

先に検討した現状の地下水塩分濃度鉛直分布状況の特性を考慮して、以下に浚渫深さ D を考慮した塩水楔定常理論式を示す。

解析の前提条件は、

- 透水層は自由表面を有し、均質・等方で深さ一定の不透水層上にある。
- 淡水と塩水の混合は無視できるほど小さく、それぞれの密度は ρ_f , ρ_s ($\rho_f < \rho_s$) で表わされる。
- 海底には厚さ D の堆積層があり、その透水係数、間けき率を k_s , λ_s とする。
- 滞水層を図-6のように I と II に分割して考え

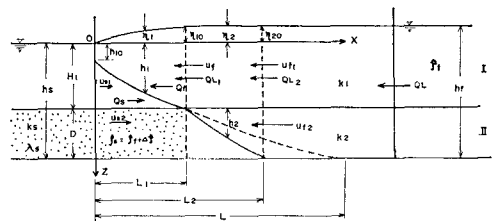


図-6 定常界面と座標系

る。また楔が I 層との境界面と交わる点までの海岸線からの距離を L_1 , II 層とのそれを L_2 , 堆積層がない場合のそれを L とする。

流れは 1 次元流とし、Darcy 則に従うものとして定常界面について検討すれば $u_s = 0$ であるから、運動方程式は、

$$u_f = -\frac{k_1}{\rho_f g} \cdot \frac{\partial p_1}{\partial x},$$

$$p_1 = \rho_f g(z + \eta_1) \dots \dots \dots (1)$$

$$u_s = -\frac{k_2}{\rho_s g} \cdot \frac{\partial p_2}{\partial x} = 0,$$

$$p_2 = \rho_f g(h_1 + \eta_1) + \rho_s g(z - h_1) \dots \dots \dots (2)$$

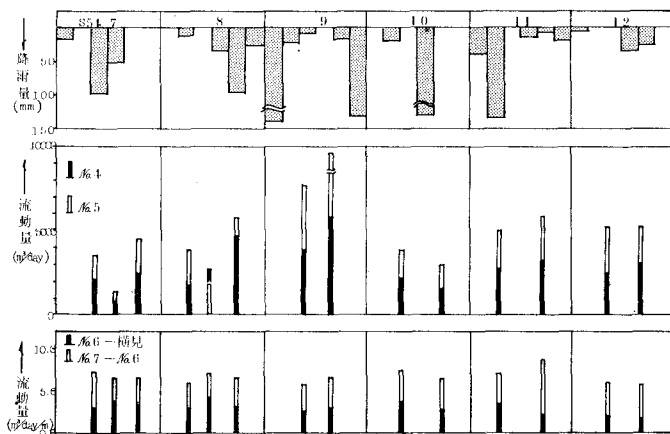


図-5 推定地下水流動変化 (S 54 年 7 月~12 月)

第1層, 2層に対して,

$$u_f = -k_1 \frac{\partial \eta_1}{\partial x}, \quad u_{f1} = -k_2 \frac{\partial \eta_2}{\partial x}, \quad u_{f2} = -k_2 \frac{\partial \eta_2}{\partial x} \quad (3)$$

連続式は,

$$\left. \begin{aligned} u_f(\eta_1 + h_1) &= Q_f = Q_{L1} \\ u_{f1}(\eta_2 + H_1) + u_{f2}h_2 &= Q_{L2} \\ Q_L &= Q_{L1} = Q_{L2} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

第1層に対して式(1)と式(4)より $\eta_1 = \varepsilon h_1$ を考慮すれば,

$$-\frac{k_1 \varepsilon (1 + \varepsilon)}{2} \cdot \frac{\partial}{\partial x} (h_1^2) = Q_L \quad (5)$$

上式(5)を積分し境界条件 $(x, h_1) = (0, h_{10})$ を考慮すれば,

$$-\frac{k_1}{2} \varepsilon (1 + \varepsilon) (h_1^2 - h_{10}^2) = Q_L x \quad (6)$$

上式(6)は $k_1, \varepsilon, h_{10}, Q_L$ が既知なら定常界面を与える式となる。

ここで $h_1 = H_1$ となる第1層の楔の足までの距離 L_1 は,

$$L_1 = \frac{k_1 \varepsilon (1 + \varepsilon)}{2 |Q_L|} \cdot (H_1^2 - h_{10}^2) = \frac{\varepsilon k_1}{2 |Q_L|} \cdot (H_1^2 - h_{10}^2) \quad (7)$$

第2層に対しても同様に展開すれば,

$$-\frac{\varepsilon}{2} \cdot (\varepsilon k_1 + k_2) h_2^2 - k_1 \varepsilon (1 + \varepsilon) H_1 h_2 = Q_L (x - L_1) \quad (8)$$

上式は式(6)と同様 $k_1, k_2, \varepsilon, Q_L, L$ が既知なら第2層の定常界面を与える。

また, 式(1), (4)より $\eta_1 = \varepsilon h_1$ を考慮すれば,

$$-k_1 \left(1 + \frac{1}{\varepsilon}\right) \eta_1 \frac{\partial \eta_1}{\partial x} = Q_L \quad (9)$$

上式を積分し, 境界条件 $(x, \eta_1) = (0, 0)$ を考慮すれば,

$$-\frac{k_1}{2} \left(1 + \frac{1}{\varepsilon}\right) \eta_1^2 = Q_L x \quad (10)$$

つまり上式(10)よりある地点 x の η_1 を測定できれば淡水流量 Q_L を決定することができる。

第2層についても同様に,

$$\begin{aligned} -\frac{1}{2} \left(k_1 + \frac{k_2}{\varepsilon}\right) (\eta_2^2 - \eta_{10}^2) \\ - H_1 (k_1 - k_2) (\eta_2 - \eta_{10}) \\ = Q_L (x - L_1) \quad (11) \end{aligned}$$

ここに h_{10} は, 佐藤⁷⁾や玉井⁸⁾の解析に基づき次式とする。

$$h_{10} = |Q_L| / (\sqrt{2} \varepsilon k_1) \quad (12)$$

以上より界面形状を与える式および楔の足までの距離は,

第1層について,

$$\left(\frac{h_1}{h_{10}}\right)^2 - 1 = \frac{2 |Q_L| x}{\varepsilon k_1 h_{10}^2} \quad (13)$$

$$L_1 = \frac{\varepsilon k_1}{2 |Q_L|} (H_1^2 - h_{10}^2) \quad (14)$$

第2層について,

$$\begin{aligned} \left(\varepsilon + \frac{k_2}{k_1}\right) \left(\frac{h_2}{h_{10}}\right)^2 + 2 \left(\frac{h_2}{h_{10}}\right) \left(\frac{H_1}{h_{10}}\right) \\ = \frac{2 |Q_L| (x - L_1)}{\varepsilon k_1 h_{10}^2} \quad (15) \end{aligned}$$

$$L_2 = L_1 + \frac{\varepsilon (\varepsilon k_1 + k_2) D^2}{2 |Q_L|} + \frac{k_1 \varepsilon H_1 D}{|Q_L|} \quad (16)$$

以上の提案式を用いて解析を実施する。

3.2 解析条件

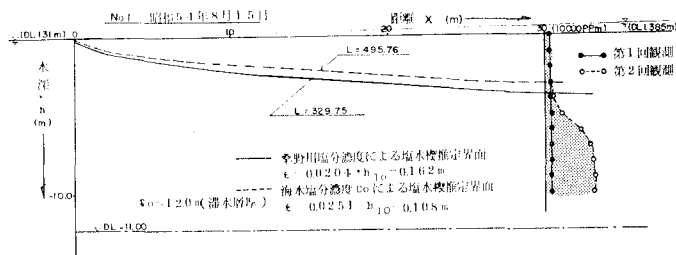
浅井戸 No. 1 の前面には矢板等の遮水構造物が存在せず, No. 2 ではそれが存在するが, この遮水構造物を無視して淡塩界面の推定を試みた。なお, 塩水の密度としては河道内の平均塩分濃度と河口の海水濃度の2種類を用いた。

3.3 解析結果

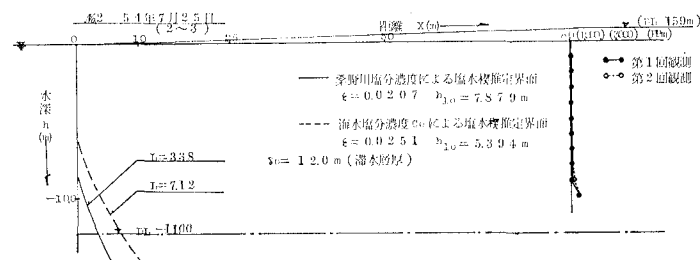
図一7に解析結果の一例を示した。

No. 1 における淡塩界面の推定形状は, 現状の塩分濃度の鉛直分布状況における濃度勾配急変点とよく一致しており, 先に考察した密度一定とし塩水と淡水の混合を無視する楔理論の適用の妥当性を裏づけるものである。

しかし, No. 2 における解析結果は塩分濃度の鉛直分布状況の濃度勾配急変点とは一致せず, その推定界面形状あるいは楔足長自体観測結果を推定するまでには致っていない。これは, 前面に矢板等の遮水構造物が存在しないと仮定して解析した結果であるため, 実際現象とし



(a) 淡塩界面推定結果 (No. 1)



(b) 淡塩界面推定結果 (No. 2)

ての水際線部における矢板等の遮水構造物による地下水の貯留効果のため、見かけ上河川水位との間の動水勾配が過大となり、地下水自流量の推定結果が大きく見積られたことによるものと思われる。

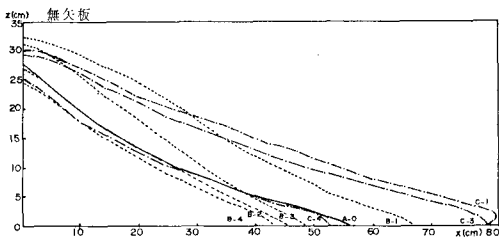
ここで同図の浅井戸 No. 1 と No. 2 の実測塩分濃度鉛直分布とその淡塩界面の推定結果を基に考察する。浅井戸 No. 2 における動水勾配が No. 1 のそれと同じであり、前面には遮水構造物が存在しないと仮定するならば、2 地点の違いは水際線からの観測点距離の違いのみであることから、No. 1 の推定結果と同様に鉛直方向の塩分濃度の濃度勾配の急変点と推定淡塩界面は同程度の一致性を示すものと思われる。しかし、実際の濃度勾配の急変点はその推定淡塩界面よりもかなり下回った位置に存在することから、遮水構造物の影響を無視することはできない。

このことは滞水層中に矢板等の遮水構造物を考慮した砂層モデル実験からも明白であり、塩水楔の侵入長はかなり抑制されることがすでに知られている⁹⁾。

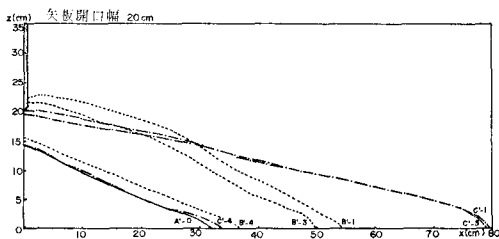
以上の結果から、前面に遮水構造物の存在しない区間においては本論文に示す提案式を用い、前面にそれが存在する区間においては矢板等の遮水構造物の存在しない区間における解析結果に、遮水構造物による塩水侵入抑制効果を加味することによって、浚渫による影響度を評価するものとする。

3.4 塩水侵入に対する遮水構造物の影響

先に述べた矢板等の遮水構造物を考慮した砂層モデル実験の結果の一例を図-8 に示す。この図は定常状態における淡塩界面の形状を示したものであるが、矢板開口幅に応じて塩水化域が変化していることがわかる。さらに特筆すべき性状としては、矢板開口幅の違いによる塩



(1)



(2)

図-8 砂層モデル実験結果

水楔の侵入高及び侵入長にはそれぞれ差が見られるが、その比率は約 1:2 程度であり、相似の三角形形状を呈していることである。

つまり、矢板の存在によって見かけ上動水勾配は変化するが、矢板の有無以外の条件が同じであれば、無矢板時の楔侵入長と矢板挿入時のそれには比例的関係があるものと推定される。

4. 感潮河川内浚渫による塩水化現象の変化予測

4.1 浚渫の規模および解析条件

富岡港内の浚渫規模は平面的には図-1 に示した斜線部のようにであり、横断的には例えば No. 2 付近で図-9 のようである。



図-9 予測モデル概略図

予測計算の条件としては、浚渫深さ D を辰巳側 5m、富岡側 2m とし、淡水と海水の密度差は最悪条件を考慮して $\epsilon=0.03$ とする。

ここで問題となるのは第 1 層と第 2 層の透水係数及び動水勾配（地下水自流量あるいは揚水量）であるが、第 1 層は現況の値 $k_1=0.201 \times 10^{-3}$ m/sec とし、第 2 層は $k_2=k_1$, $1/10 \cdot k_1$, $1/100 \cdot k_1$ と仮定し、さらに動水勾配は $I=1/500$, $1/700$, $1/1000$ 程度と設定し、前述の提案式で各種組合せの検討を実施した。この結果、透水係数を変化させても第 1 層の楔侵入長にはほとんど差が現われず、むしろ動水勾配の違いによる影響が大きいことが判明したため、この点を重視した。なお、上記の詳細については講演中に述べる。

4.2 解析結果

先に示した砂層モデル実験結果から矢板開口比と楔侵入長との関係を示せば、図-10 のようになる。浅井戸 No. 1 と No. 2 との解析上の違いは遮水構造物の存在の有無によるものであるため、No. 2 のような状態下に存在する塩水楔の侵入長は、先に考察した内容に従い同図を用いて推定し得る。

以上より港湾浚渫による地下水塩水化域の変化予測結果を

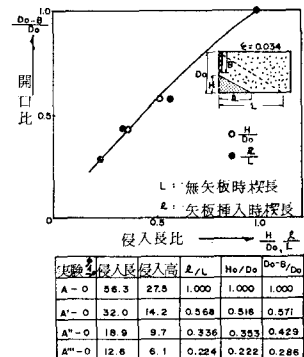


図-10 矢板挿入時の開口比と塩水化域長の関係

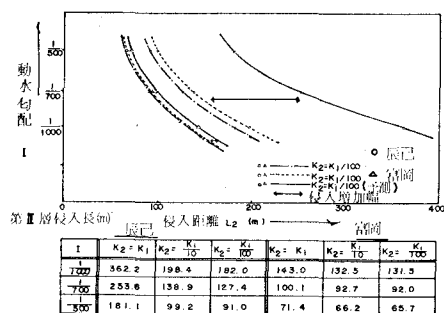


図-11 予測結果

富岡側及び辰巳側について示せば、図-11 のようになる。すなわち富岡側においては最悪の場合で現状の 1.1 倍、辰巳側においては無矢板の状態で現状の約 1.8 倍であるが、すでに矢板施工が実施されているため、この矢板の効果を考慮すれば無矢板時の推定結果の 1/5 倍程度となる。

以上のように現状の矢板による遮水効果等を検討すれば、両地区における浸漬による影響はほとんどないものと予測される。

5. おわりに

本論文では、無矢板時における理論式の誘導とその検証を現地観測結果と照合することによりその有用性を明らかにした。さらに、矢板等の遮水構造物による塩分侵入の抑制効果に対しては若干の砂層モデル実験を実施

し、その定量的把握結果を提案式を用いた推定結果に加味して検討した。しかし、本論文における提案式中には遮水構造物の影響を式中に導入するまでには到っていないため、さらに詳細な砂層モデル実験等を行なうとともに、理論式の展開に対する余地を残している。

謝辞： 本調査に際し、徳島県土木部港湾課および徳島県阿南土木事務所に御協力頂いた。ここに厚く感謝する。

参考文献

- 1) 尾島 勝：揚水による塩水化現象の変化に関する解析，第 24 回海講論文集，pp. 553～557，1977。
- 2) 尾島 勝：揚水による塩水化現象の変化に関する解析(Ⅱ)，第 25 回海講論文集，pp. 494～498，1978。
- 3) 尾島 勝・天羽誠二・鎌田義人：不圧滞水層中における塩分濃度変化に関する考察，中四支部年講概要，Ⅱ-10，1979。
- 4) 尾島 勝・鎌田義人・板東敏雄：不圧滞水層への塩分塩入に対する揚水および護岸矢板の効果に関する実験的研究，第 27 回海講論文集，pp. 357～541，1980。
- 5) 三井 宏・尾島 勝・村上仁士：徳島県沿岸部における底質分布，潮位振動特性，地下水塩分の調査結果，第 26 回海講論文集，pp. 633～637，1979。
- 6) 徳島県阿南土木事務所：昭和 54 年度港湾改修工事調査委託富岡港地質水質調査成果報告書（解析編），1980。
- 7) 佐藤邦明・渡辺邦夫：成層帯水層における地下塩水楔の挙動，第 19 回水講論文集，pp. 127～132，1975。
- 8) 玉井信行：新体系土木工学，22 密度流の水理，技報堂出版，pp. 168～169，1980。
- 9) 前出 4)。