

16. 島嶼における海岸地下水への塩水浸入対策に関する研究

○富樫聡(八千代エンジニアリング), 古川正修(国際航業),
藤縄克之(信州大・工)

1. はじめに

IPCC の第 3 次評価報告書によれば, 1990 年から 2100 年の間に地上平均気温は 1.4℃から 5.8℃上昇し, 極地帯の氷床が融解したり, 海水が膨張することにより, 海面が 9cm~88cm 上昇すると予測されている¹⁾. この予測が現実のものとなれば, モルディブ諸島, マーシャル諸島, ツバル諸島, フィジー諸島, 南西諸島等の多くの島嶼では, 島の大部分が水没するという深刻な事態に直面することになる. また, 島嶼の多くは地形・地質的要因から水資源の確保が困難で, その多くを地下水に頼る傾向がある. このような地域では, 今後地下水の塩水化が進み, 水資源が甚大な影響を被るものと予想される. したがって, 島嶼における新たな水資源開発や地下水塩水化防止技術等の開発が極めて重要となる. そこで本研究では, 地下ダムや不完全貫入遮水壁などの導入が水資源確保に果たす役割を, 塩水浸入解析コード SIFEC (Salt-water Intrusion by Finite Elements and Characteristics)²⁾を用いた数値解析により検討した. また, 本解析結果を既存の解析コード FEFLOW(Finite Element simulation for density-dependent Flow)を用いた解析結果と比較を行い, 各コードによる結果の検討を行った.

2. 塩水浸入解析

2.1. 基礎理論

海岸帯水層への塩水浸入現象は, 密度を考慮した飽和・不飽和多孔体中の浸透流に対する支配方程式と移流および分散を伴う塩分輸送に対する支配方程式を連成させることにより解析できる.

流体の密度を考慮した飽和・不飽和多孔体中における浸透流の基礎方程式は

$$\rho \left(SS_s \frac{\partial h}{\partial t} + C_s \frac{\partial h}{\partial t} \right) + nS \frac{\partial \rho}{\partial t} = \nabla \cdot \left\{ \rho K \nabla \left(h + \frac{\rho z}{\rho_f} \right) \right\} \quad (1)$$

で与えられる. ここに, h は淡水水頭, S は有効飽和度, S_s は貯留係数(不飽和帯では $S_s = 0$), $C_s (= n \partial S / \partial h)$ は比水分容量(飽和帯では $C_s = 0$), n は間隙率, K は透水係数, z は鉛直上向き座標軸である. なお, 流体密度 ρ は, 淡水密度 ρ_f , 塩水密度 ρ_s , および流体の塩分相対濃度 c を用いると, 次式で表現できる.

$$\rho = \rho_f + (\rho_s - \rho_f)c \quad (2)$$

一方, 塩分輸送に対する支配方程式は移流項と分散項を含むため移流分散方程式と呼ばれ, その基礎方程式は次式で与えられる.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \nabla \cdot D_{ij} \nabla c - c \nabla \cdot \mathbf{v} - \mathbf{v} \nabla \cdot c \quad (3)$$

ここに, D_{ij} は水力学的分散係数, \mathbf{v} は間隙流速ベクトルである.

2.2. 解析コード SIFEC と FEFLOW の特徴

表-1 に SIFEC と FEFLOW の解析手法の比較を示す. いずれのコードも非定常地下水流動方程式と物質輸送方程式を連成させており, 式(1)にはガラーキン型有限要素法を適用している. ここでは特に, 解析精度を左右する移流分散方程式の解法について比較する.

表-1 SIFEC と FEFLOW の解析手法の比較

| FEFLOW | Diersch, H.J.G. | Galerkin 有限要素法 (風上法) | Galerkin 有限要素法 | 2,3 | 飽和・不飽和 | Mesh refinement |
|--------|-----------------|--|----------------|-----|--------|-----------------|
| SIFEC | 藤縄克之 | 特性曲線法(移流項) -Galerkin 有限要素法 (分散項) | Galerkin 有限要素法 | 2 | 飽和・不飽和 | SRPT, 双2次濃度補間 |

FEFLOW では解の振動を防ぐために風上有限要素法を用いているが、風上法の導入は移流分散に起因する大きな誤差を誘導する。これに対して、SIFEC では移流分散方程式を双曲型の移流項と放物型の分散項に分離し、移流項に特性曲線法、分散項に有限要素法を適用する特性曲線型有限要素法 (Characteristic Finite Element Method: CFEM) を用いている。なお、CFEM は解の振動を防ぎ、さらに数値分散を緩和する上で有効なことが示されている²⁾。

2.3. 解析条件

本研究では南西諸島を解析対象とし、解析領域は想定した半島の中心から左半分の矩形鉛直 2 次元断面 (高さ 20m, 巾 160m) とした (図-1)。

飽和・不飽和密度依存浸透流解析、および塩分輸送解析のための境界条件を、それぞれ図-2、図-3 に示す。図-2 で、NHS から NH までの区間は不透水境界および浸潤面境界 (浸潤面は反復法により特定)、また、解析領域下部および右側は不透水境界、NH1 から NPOIN の区間は定水頭境界、上部は定流量境界 (涵養域) としている。また、 H_s は基準面から海水面までの高さ (15.0m) で、一定とした。なお、水頭は淡水水頭で表現するため、海洋境界の既知圧力水頭は図中の式で与えられる。

図-3 で、NC1 は海洋境界における塩水浸入面最上部の節点である。塩水浸入境界 (NC1 ~ NPOIN) では $c=1.0$ とし、それ以外の境界は不分散境界 ($D \partial c / \partial n = 0$) とする。ちなみに、SIFEC では非定常過程において、海洋境界 NH1 から NPOIN の間に位置する節点における境界流速を計算することにより流出と流入の判断を行い、NC1 の位置が修正できるように工夫されている。

表-2 に解析に用いた物性値を示す。なお、 α, β は vanGenuchten による水分特性曲線式のパラメータである。また、SIFEC および FEFLOW 適用結果の比較計算においては、表-3 (この解析ケースをケース 1 とする) に示す透水係数と涵養量の値を適用した。

初期条件は、基盤面から高さ 14.5m までが塩水で、塩水の上に 1.0m の厚さの淡水が乗っているものとした。

3. SIFEC と FEFLOW の解析結果の比較

図-4 に、同一の解析領域、要素分割、境界条件、初期条件、パラメータを適用し、SIFEC と FEFLOW を用いて解析した定常状態における塩分濃度分布を示す。

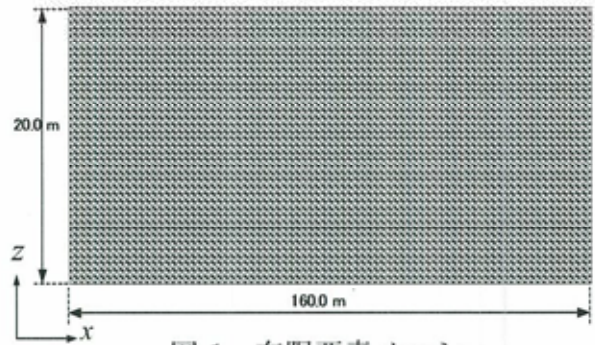


図-1 有限要素メッシュ

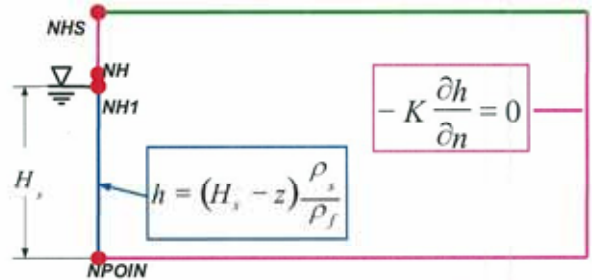


図-2 浸透流解析のための境界条件

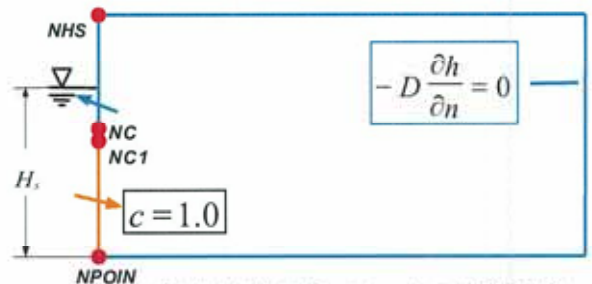


図-3 塩分輸送解析のための境界条件

表-2 数値解析に用いた物性値

| | 物性値 |
|---------------------------|--------|
| 淡水密度 (g/cm ³) | 1.000 |
| 塩水密度 (g/cm ³) | 1.025 |
| 縦分散長 (m) | 0.500 |
| 横分散長 (m) | 0.050 |
| 間隙率 | 0.3780 |
| 残留体積含水率 | 0.0945 |
| α (1/m) | 4.100 |
| β | 1.960 |

表-3 ケース 1 の解析条件

| | ケース 1 |
|---------------|--------------------|
| 透水係数 (m/year) | 9.15×10^3 |
| 涵養量 (m/year) | 0.73 |

SIFEC では濃度に規則性のある汽水域が形成されたが、FEFLOW では汽水域が異常に広くかつ不規則な分布となった。また、FEFLOW では、風上法に特有な解の振動のため、不飽和領域で非現実的な高塩分濃度値が出現したり、負の濃度値が出現した。さらに、FEFLOW では塩水浸入境界を固定境界

として計算せざるを得ず、解析に用いるパラメータの値も制限されるほか、地下ダムや不完全貫入遮水壁の設定が困難である等の種々の問題点があることがわかった。

4. 種々のケースにおける解析結果

次に、SIFEC を用いて表-4 に示すケースに対する解析を行った。

(1) ケース 2 では、巾 40m の浸透池から 4.2m/y の強度で涵養を行い、他の条件はケース 1 と同様とする設定を行った。

(2) ケース 3 では、ケース 2 の浸透池に加えて、深さ 15m の不完全貫入遮水壁を設置した。

(3) ケース 4 では、ケース 2 に加え、海洋境界から 50m の位置に基盤から 15m の高さの地下ダムを設置した。

(4) ケース 5 では、ケース 2 に加え、前述の不完全貫入遮水壁および地下ダムをそれぞれ設置した。

図-5, 6, 7, 8 は、ケース 2, 3, 4, 5 における、定常に至るまでの塩分濃度分布の変化を示したもので、以下にこれらの地下水開発技術が島嶼における水資源確保に果たす役割を検討する。

まず、ケース 2 の解析結果より、浸透池

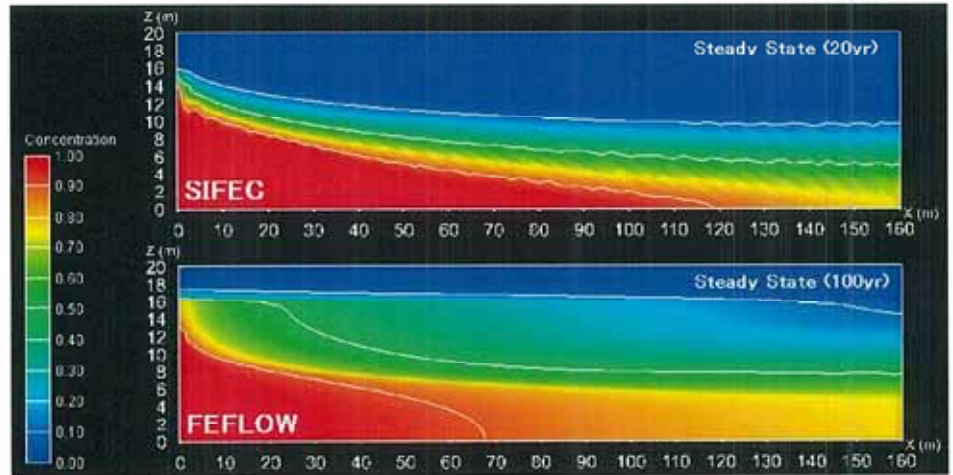


図-4 SIFEC と FEFLOW の解析結果の比較

表-4 種々の解析ケース

| | 透水係数 (m/year) | 涵養量 (m/year) |
|------|-------------------------|--------------|
| ケース2 | 9.15×10^3 | 0.73 - 4.20 |
| | 上部境界(x=120~160m)に浸透池を想定 | |
| ケース3 | 9.15×10^3 | 0.73 - 4.20 |
| | 浸透池と遮水壁を想定 | |
| ケース4 | 9.15×10^3 | 0.73 - 4.20 |
| | 浸透池と地下ダムを想定 | |
| ケース5 | 9.15×10^3 | 0.73 - 4.20 |
| | 浸透池と遮水壁と地下ダムを想定 | |

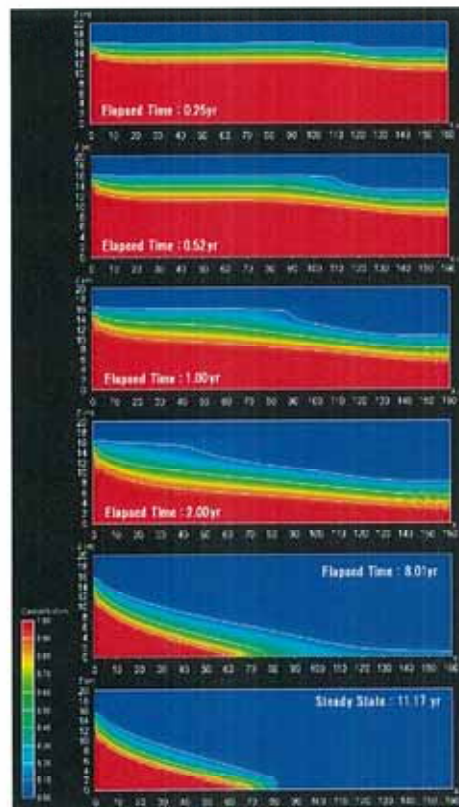


図-5 ケース 2 の解析結果

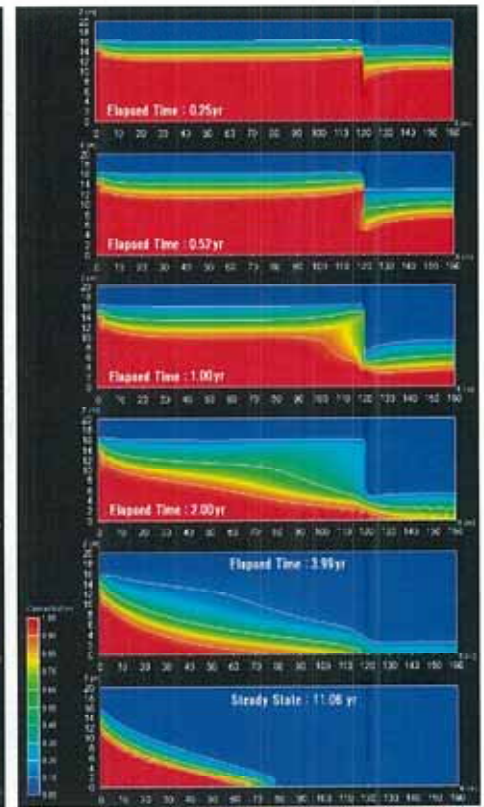


図-6 ケース 3 の解析結果

を設置することで淡水の貯留効果が大きくなること、また、浸透池より淡水が供給され、塩水を海洋方向へ押し戻していることが分かる。このような浸透池による人工涵養は、実際に多くの島嶼国において行われている地下水開発技術であり、非常に効果的な技術であると言える。

不完全遮水壁を設置したケース 3 の解析結果より、遮水壁より内陸側において効率的に淡水が貯留されることが確認できる。しかし、定常状態にお

ける塩分濃度分布および定常に達するまでの時間(約 11 年)はケース 2 とほとんど変わらず、不完全貫入遮水壁による淡水域の拡大は見られなかった。

ケース 4 の解析結果から、地下ダムを設置することにより、さらに効率的にそして確実に淡水が貯留できることがわかる。当然のことながら、初期条件で設定した領域内部の塩水は、やがて地下ダムよりすべて淡水に置換されることが確認できる。

不完全貫入壁と地下ダムを同時に設置したケース 5 の計算初期の段階では、ケース 3 の場合と同様に不完全貫入壁による速やかな淡水の貯留が見られた。その後、時間の経過に伴ってケース 4 で見られた特徴が顕著になり、定常状態における塩分濃度分布はケース 4 とほぼ同様となった。また、定常に達するまでの時間も約 20 年とケース 4 とケース 5 では大差がなかった。

5. 考察

SIFEC と FEFLOW の解析結果を比較したところ、SIFECの方がより信頼性が高く、本研究で行ったような島嶼における海岸帯水層への塩水浸入現象の解析には SIFEC が適していることが確認できた。なお、SIFEC に比べ FEFLOW の解析精度が低かった原因は、FEFLOW では移流分散方程式を分散項のみならず移流項もガラーキン型有限要素法を用いてオイラー的に解析しているため、SIFEC による解析では生じない数値分散や解の振動による計算誤差が発生したためである。

SIFEC を用いて浸透池や地下構造物等の地下水開発技術が地下水資源確保に果たす役割を数値解析により検討したところ、浸透池を用いた人工涵養により淡水の賦存量が増加すること、不完全貫入遮水壁により速やかな淡水の貯留が見込めること、地下ダムにより多量の淡水の貯留が可能であること等を確認することができた。これらの解析は島嶼における新たな水資源開発や地下水の塩水化を阻止するための技術開発に大いに役立つものと考えられる。

参考文献

- 1) IPCC: Technical Summary, Climate change 2001; Impacts, adaptation, and Vulnerability, 2001.
- 2) 藤縄克之, 増岡健太郎, 長野宇規, 渡邊紹裕: 海面上昇がゼロメートル地帯に及ぼす影響を予測するための塩水浸入数値解析モデル, 土木学会論文集, 2005 (印刷中).

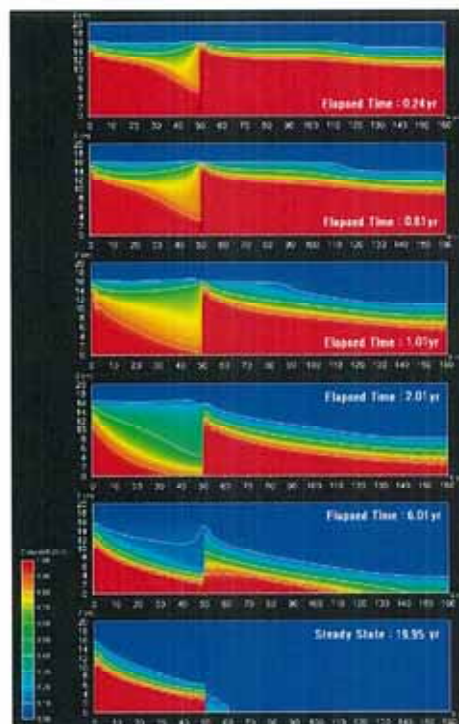


図-7 ケース 4 の解析結果

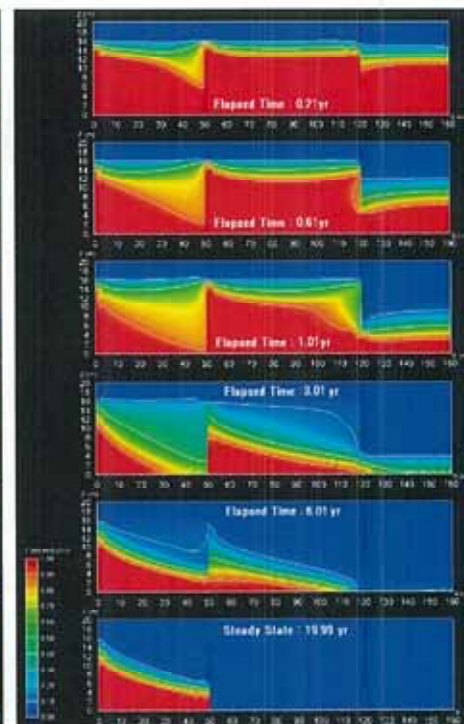


図-8 ケース 5 の解析結果