

境界積分方程式法による地下空洞への海水侵入予測

PREDICTION OF SEA WATER INTRUSION TO UNDERGROUND CAVERNS
BY MEANS OF BOUNDARY INTEGRAL EQUATION METHOD IN COASTAL ROCK MASS

佐藤 邦明*・福原 輝幸**・伊藤 洋***

By Kuniaki SATO, Teruyuki FUKUHARA and Yo ITO

The encroachment and intrusion of the sea water wedge toward the underground caverns in coastal rock mass are investigated experimentally and theoretically. The theoretical analysis was done by using the boundary integral equation method. The experiments are conducted in the Hele-Shaw model with two different densities of fluids. Comparing theoretical results with experimental ones, the application technique of the boundary integral equation method for analyzing the fresh-sea water interface in coastal rock aquifer was confirmed. In addition, the process of sea water encroachment around caverns was made clear.

Keywords: groundwater, rock mass, cavern, numerical method

1. はじめに

昨今、燃料地下備蓄や核廃棄物の岩盤処分などにかかわる岩盤地下空間が注目されており、地下空間の利用形態は別としても、トンネルも含めた地下空洞の合理的な調査・設計法や水理・水文学解析の開発が望まれている。通常、これら岩盤地下空洞を計画・設計しようとする際、予備調査を経て建設サイトが選定され、予備設計から本調査・設計に入る手順となる。こういったプロセスにおいて空洞にかかわる地下水についてもあらかじめある程度湧水量や地下水挙動を予測してから本調査・設計の段階で地下水数値シミュレーションによってより詳細な検討を行うのが望ましい姿であろうと思われる。その際、地下水問題としては、水文学的な地下水収支の把握に加え、岩盤地山の水理として、空洞への湧水量、周辺水圧、水面形といったもの、さらに空洞が海岸に近接して作られる場合は空洞への流れによって誘発される海水侵入の問題がある。

空洞へ海水が侵入すること自体がとり分けて問題となるのは空洞内あるいは周辺補助空洞に設ける配管系やポンプなどの施設の腐食、さらに地下水環境の変化が与える影響について配慮を要するからである。塩水くさびの解析については従来より多くの研究がなされ、最近では河野ら¹⁾、柿沼ら²⁾は有限要素法により、靱井ら³⁾は差分法によって塩水の拡散を考慮した解析を行っている。しかし、本研究で対象とするような空洞周辺の不圧地下水で自由水面と塩水くさびが相互に大きく依存・変化し、界面が大変形する場や岩盤地山特有の不均質性を有する場におけるこの種の解析はほとんどなされていない。

本論は、こういった背景から、従来ほとんど関心がもたれていなかった臨海岩盤空洞への海水侵入予測に関し、ヘル・ショウ実験と解析を試み、検討を加えた。特に、この種の解析手法として境界積分方程式法を適用することによりプログラムの軽量化を図り、このような複雑に変化・変形する自由水面と淡塩界面の非定常解析を可能にした。いくつかの新しい成果が得られたのでここにまとめて報告する。

2. 境界積分方程式法の淡塩界面解析への応用

(1) 境界積分方程式の数学的記述

* 正会員 工博 埼玉大学助教授 工学部地盤水理実験施設 (〒338 浦和市下大久保 255)

** 正会員 工博 福井大学助教授 工学部建設工学科 (〒910 福井市文京 3-9-1)

*** 正会員 (株)熊谷組 原子力開発室土木技術部 (埼玉大学研究生) (〒162 新宿区津久戸町 17-1)

水理問題に限らず、一般に多くの力学現象の解明に当たって微分方程式を直接解く差分法や変分原理を応用した有限要素法が今日の数値解析の主流となっている。しかし、昨今微分方程式の初期・境界値問題を積分方程式に帰着させて解く境界積分方程式法 (boundary integral equation method: BIEMと略記) が注目されている。この方法は境界を有限分割してそれぞれの区間で境界積分を実行することから境界要素法 (boundary element method: BEM) に含まれる。差分法や有限要素法が解析領域全体に未知量を離散化して解析するのに比べて、BIEMは領域の境界に未知量を集約して解析するのが特色である。したがって、前者に比べて後者は対象領域の空間次元が1つ下がるため計算時の入力データや計算時間を大幅に縮小し得ることとなる。

BIEMの浸透流解析への応用は主に、(i) ダムや堤防内の自由水面に関する非定常問題、(ii) 被圧帯水層中の淡水・塩水境界のような内部界面の移動に着目した問題、(iii) 不圧帯水層中の自由水面と内部界面の非定常問題に分類され、たとえば(i)に関しては、Liggett⁴⁾、LiuとLiggett⁵⁾、Lennonら⁶⁾、山上・岡田⁷⁾、(ii)に関しては、Liuら⁸⁾、藤野⁹⁾、(iii)に関しては唯一TaigbenuとLiggett¹⁰⁾の研究が挙げられる。中でも(iii)は自由水面と内部界面が相互に、かつ敏感に影響を及ぼし合うこととなり、その結果自由水面の微小変化が二液体の密度差により拡大的に界面変化に転嫁される。そのため、解析にあたっては(i)、(ii)より優れた解析手法が要求される。Taigbenu¹⁰⁾の研究では残念ながら塩水くさび上の淡水域は一次元流れを仮定して解析されており海岸近傍での塩水くさび形状に不合理さを残している。

こういった背景にあって、ここでは始めにBIEMの一般的解析の手順を述べ、ついで本解析への応用、注意事項を系統的に説明する。

いま、Fig.1に示すような1つの閉曲面Sで囲まれた領域Qを考える。この境界面Sは、その上の任意点で外向きに引いた法線nの方向がその点の移動に伴って、連続に変わる面であるとする。一般的にポテンシャルΦが領域Q内でラプラス方程式を満たすとき、特異点

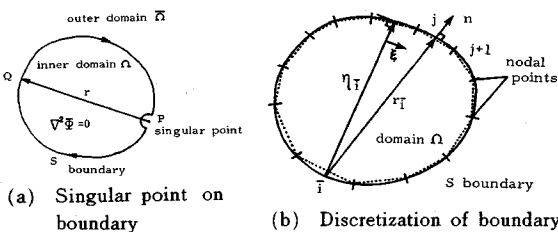


Fig.1 Analytic domain of boundary integral equation method.

Pの位置によりそれらの表現が変わる。特に、Pが流れの領域および境界上にあるとき、積分方程式は次のようになる。

$$2\pi\Phi(P) = \int_S \left[\Phi \frac{\partial}{\partial n} (\ln r) - \ln r \frac{\partial \Phi}{\partial n} \right] dS \dots \dots \dots (1)$$

$P \in Q$

$$\pi\Phi(P) = \int_S \left[\Phi \frac{\partial}{\partial n} (\ln r) - \ln r \frac{\partial \Phi}{\partial n} \right] dS \dots \dots \dots (2)$$

$P \in S$

ここに、 $\ln r$ (r:境界S上の点Qと特異点Pとの距離) は基本特異解である。

(2) 非混合2液体浸透流の基本式

次に、積分方程式を2液体浸透流の解析に適用するために必要な基本式と境界条件について述べる。

Fig.2は密度差の異なる2つの液体からなる浸透領域を示したものであり、界面は明瞭に存在するものと仮定する。

非圧縮性流体の浸透流がダルシー (Darcy) 則に従うものとするれば、

$$u_i = -k_{xi} \frac{\partial \phi_i}{\partial x}, \quad w_i = -k_{zi} \frac{\partial \phi_i}{\partial z} \quad (i=1, 2) \dots \dots (3)$$

と書ける。ここに、 k_{xi} 、 k_{zi} : x軸方向 (水平)、z軸方向 (鉛直) の透水係数、 ϕ_i : ピエゾ水頭であり、それらは次式で表わされる。

$$k_{xi} = \frac{\rho_i g K_x}{\mu_i}, \quad k_{zi} = \frac{\rho_i g K_z}{\mu_i} \dots \dots \dots (4)$$

$$\phi_i = \frac{p_i}{\rho_i g} + z \dots \dots \dots (5)$$

ここに、添字iは流れの領域 (i=1, 2) を表わし、 K_x 、 K_z : 固有浸透係数、 ρ : 液体の密度、 μ : 粘性係数、 g : 重力加速度、 p : 水圧、 z : 不透水性基盤から鉛直上向き座標を表わす。

非圧縮性流体の流れは領域iについて連続式を満たすから次式が成り立つ。

$$\frac{\partial u_i}{\partial x} + \frac{\partial w_i}{\partial z} = 0 \dots \dots \dots (6)$$

式(4)、(5)を式(6)に代入すると、次式を得る。

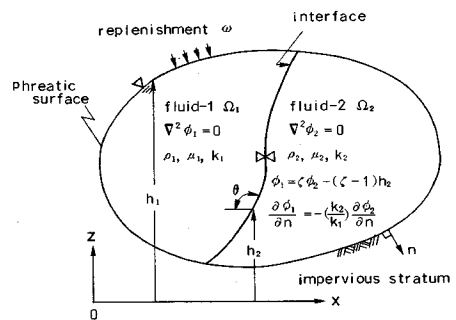


Fig.2 Analytic modelling of 2 fluids flow.

$$k_{xi} \frac{\partial^2 \phi_i}{\partial x_i^2} + k_{zi} \frac{\partial^2 \phi_i}{\partial z_i^2} = 0 \dots\dots\dots (7)$$

1つの等方・均質な浸透流場内では、 $k_x = k_z (=k)$ が成立するから、式(7)は次のようなラプラス方程式に書き換えられる。

$$\frac{\partial^2 \phi_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi_i}{\partial z^2} = 0 \dots\dots\dots (8)$$

(3) 塩水くさびの境界条件とそれらの構成

浸透流問題の多くはラプラス方程式の内部混合境界値問題(デリクレ型とノイマン型の両者を含む境界値問題)であり、本論で扱うような岩盤中の淡塩2相流の浸透流問題に関しても例外ではない。

Fig. 3は地下空洞を有する海岸岩盤中の塩水くさびモデルであり、モデルに含まれる仮定は以下の3つとする。

- (i) 海域における塩水は静止している。
- (ii) 淡水は海域に流出して直ちに混合する。
- (iii) 等方・均質帯水層や岩盤内の淡塩境界面は明瞭であるとする。

本モデルにおいて淡水域を領域1、塩水域を領域2と区別する。境界は①~⑦で構成され、運動学的条件と力学的条件を用いて、次の(a)~(g)のように与えられる。

(a) 境界①は自由水面であり、
 $\phi_1 = h_1 \dots\dots\dots (9)$

で与えられる。また、自由水面の非定常変化は
 $\partial h_1 / \partial t = -k [1 + (\partial \phi_1 / \partial x)^2]^{1/2} \partial \phi_1 / \partial n, \phi_1 \text{ on } z = h_1 \dots\dots\dots (10)$

で与えられる。
 (b) 境界②(地下空洞面)はいずれも浸出面であり、境界値は、

$$\phi_1 = p_0 / \rho g + z \dots\dots\dots (11)$$

で与えられる。ただし、地下空洞の空気圧は水頭換算大気圧 p_0 に等しいとする。

(c) 境界③は淡水の海側への流出面であり、力学的条件(圧力つり合い条件)に従って、境界条件は、

$$\phi_1 = \zeta H - (\zeta - 1)z, \zeta = \rho_2 / \rho_1 \dots\dots\dots (12)$$

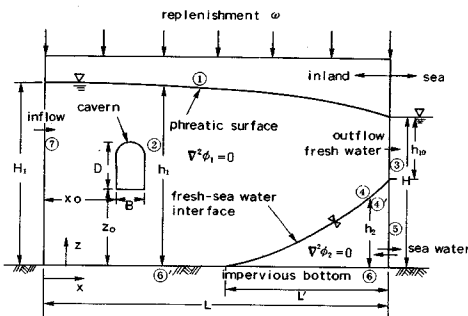


Fig. 3 Cavern model in coastal rock mass.

で与えられる。ここに、 H : 海水深、 ρ_2 : 海水の密度、 ρ_1 : 淡水の密度を表わす。

(d) 境界④は淡水と塩水境界を表わす。同境界では既知なる境界条件は存在せず、式(13)と式(14)のような界面に関連する条件が、領域1と領域2のポテンシャルおよびその法線微分値に対する関係を連結させる。

$$\phi_1 = \zeta \phi_2 - (\zeta - 1)h_2 \dots\dots\dots (13)$$

$$\frac{\partial h_2}{\partial t} = -k \left[1 + \left(\frac{\partial \phi_1}{\partial x} \right)^2 \right]^{1/2} \frac{\partial \phi_1}{\partial n} = k \left[1 + \left(\frac{\partial \phi_2}{\partial x} \right)^2 \right]^{1/2} \frac{\partial \phi_2}{\partial n} \dots\dots\dots (14)$$

(e) 境界⑤は塩水の海側であり境界値は、
 $\phi_2 = H \dots\dots\dots (15)$

で与えられる。
 (f) 境界⑥および⑥'は不透水面であり、境界条件は、

$$\partial \phi_1 / \partial n = \partial \phi_2 / \partial n = 0 \dots\dots\dots (16)$$

で与えられる。
 (g) 境界⑦は上流端境界面であり、境界値は、
 $\phi_1 = H_1 \dots\dots\dots (17)$

で与えられる。ここに、 H_1 は上流側の淡水深を表わす。以上(a)~(g)を要約し、整理したものが、Table 1である。

(4) 境界積分方程式の離散化および解析手順

境界積分方程式を解析的に積分するために、境界をFig. 1(b)(境界を模式的に示してある)に示すような有限個の直線要素に分割する。要素内の値は一定とし各要素のピエゾ水頭 ϕ およびその微係数 $\partial \phi / \partial n$ は一定の段階関数を用いて式(2)の積分を行う。境界上の特異点 \bar{i} (境界要素の midpoint にとる) に対して、境界接点 j から $j+1$ までの区分境界積分は次のように表現される。

$$I_{\bar{i},j} = \int_{e_j}^{e_{j+1}} \left(\frac{\phi}{r_{\bar{i}}} \frac{\partial r_{\bar{i}}}{\partial n} - \frac{\partial \phi}{\partial n} \ln r_{\bar{i}} \right) d\xi \dots\dots\dots (18)$$

$$= H_{\bar{i},j} \phi - G_{\bar{i},j} \frac{\partial \phi}{\partial n} \dots\dots\dots (19)$$

ここに、 $H_{\bar{i},j}$ は二重層ポテンシャルに関する係数、 $G_{\bar{i},j}$

Table 1 Composition of boundary conditions.

boundary number	name of boundary	formulation of boundary conditions
①	free surface	$\phi_1 = h_1$ (h_1 : fresh water head)
②	cavern wall	$\phi_1 = p_0 / \rho g + z$ (p_0 : atmospheric pressure)
③	seepage out face of fresh water	$\phi_1 = \zeta H - (\zeta - 1)z$ $\zeta = \rho_2 / \rho_1$ (H : sea water head)
④, ④'	fresh-sea water interface	$\phi_1 = \zeta \phi_2 - (\zeta - 1)h_2$ $\frac{\partial \phi_1}{\partial n} = - (k_2 / k_1) \frac{\partial \phi_2}{\partial n}$
⑤	inflow and outflow of salt water	$\phi_2 = H$
⑥, ⑥'	impervious bottom	$\partial \phi_1 / \partial n = \partial \phi_2 / \partial n = 0$
⑦	upper boundary	$\phi_1 = H_1$

は一重層ポテンシャルに関する係数であり、それぞれ次のように与えられる。

$$H_{\bar{i},j} = \tan^{-1}\left(\frac{\xi_{j+1}}{\eta_{\bar{i}}}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{\xi_j}{\eta_{\bar{i}}}\right) \dots\dots\dots (20)$$

$$G_{\bar{i},j} = \frac{1}{2} \left[\xi_{j+1} \ln(\eta_{\bar{i}}^2 + \xi_{j+1}^2) - \xi_j \ln(\eta_{\bar{i}}^2 + \xi_j^2) - 2(\xi_{j+1} - \xi_j) + 2\eta_{\bar{i}} \left\{ \tan^{-1}\left(\frac{\xi_{j+1}}{\eta_{\bar{i}}}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{\xi_j}{\eta_{\bar{i}}}\right) \right\} \right] \dots\dots\dots (21)$$

このようにして、式 (21) の積分を全境界 (全要素) にわたり実行すれば、 ϕ_j と $(\partial\phi/\partial n)_j$ に関する次のような代数方程式を得る。

$$\sum_{j=1}^N G_{\bar{i},j} \left(\frac{\partial\phi}{\partial n}\right)_j = \sum_{j=1}^N H_{\bar{i},j} \phi_j, \quad \bar{i}=1, 2, 3, \dots, N \dots\dots\dots (22)$$

ここに、 N は分割要素数を表わし、式 (22) 中の $H_{\bar{i},j}$ に関して $\bar{i}=j$ のときには、 $H_{\bar{i},j} = -\pi$ となる。

一般に式 (22) は境界要素方程式とよばれており、その N 次元連立方程式を解くことで、各境界要素における未知量 ϕ または $\partial\phi/\partial n$ が求められる。

次に、上述の空洞モデルの場合について、具体的に離散化および解析手順を説明する。離散化も含めた非定常解析のための計算フローチャートは Fig. 4 に示す。

次に、空洞モデルで与えた境界番号と計算フロー

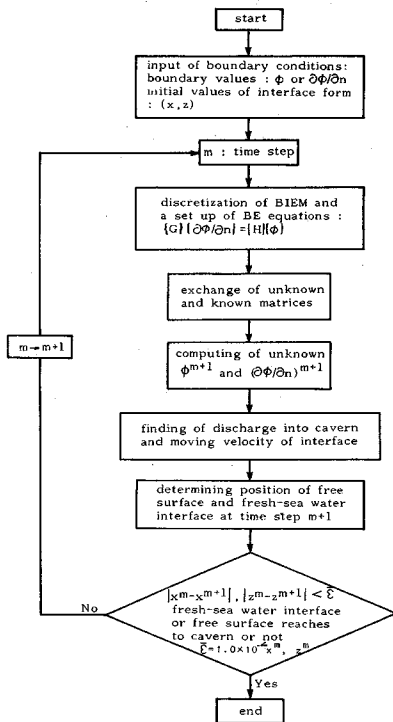


Fig. 4 Computational procedure.

チャートに従って、境界積分方程式の離散化、未知境界の決定方法、および新たな時間ステップにおける境界形状の決定方法について述べる。後述する Photo 1, 2 および Fig. 10, 11 のごとく、淡塩水の挙動は複雑であり、これを模式的に示せば Fig. 5 のように 3 つのレジームに分類することができる。そのため、境界積分方程式によって解析しようとするれば、境界形状・境界条件を考慮して少なくとも次の 3 つのレジームに分けて計算を進め得る。

レジーム①：初期定常水面形と淡塩境界面の両者が時間とともに推移して、自由水面が地下空洞に到達するまでの間、

レジーム②：レジーム①から海岸部での淡塩境界面が海水面と一致するまでの間、

レジーム③：レジーム②から淡塩境界面が地下空洞に到達するまでの間

上述したレジームはあくまで実験結果に基づいて構成されたものであり、実際の淡塩水挙動がレジーム①から③の順序で推移するとは限らない。たとえば、陸側境界水位と海域のその差が大きいと、レジーム①の過程の範囲内でのみ淡塩水挙動は終始する。解析法そのものが各レジームで変わるわけではないが、レジームごとに境界条件の設定が違ってくる。実際の計算過程で次に起こるレジームが何であるかは容易に識別できるので、解析そのものに困難は生じない。

結局、各レジームでの境界要素方程式の展開は境界条件の採り方が変わることになるが、ここでは代表的なレジーム①について説明する。

式 (22) に対応する境界積分方程式は次の行列式で与えられる。

$$[A] \begin{Bmatrix} \partial\phi_1/\partial n \\ \partial\phi_2/\partial n \\ \phi_3 \\ \partial\phi_4/\partial n \\ \phi_5 \\ \partial\phi_6/\partial n \\ \partial\phi_7/\partial n \\ \phi_8 \end{Bmatrix} = [B] \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \partial\phi_3/\partial n \\ \phi_4 \\ \phi_5 \\ \partial\phi_6/\partial n \\ (\zeta-1)h_2/\zeta \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (23)$$

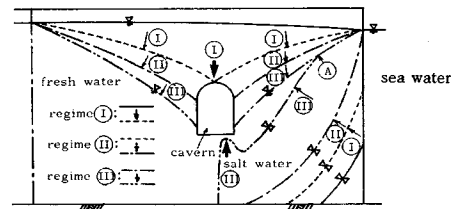


Fig. 5 Regimes of moving fresh-sea water interface and free surface change with time.

ここに、

$$[A] = \begin{bmatrix} G_1 & G_3 & -H_4 & G_4 & -H_5 & G_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{H_4}{S} & -\frac{k_1}{k_2} G_4 & 0 & 0 & -G_5 & -H_6 \end{bmatrix}$$

$$[B] = \begin{bmatrix} H_1 & H_3 & -G_6 & H_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & H_5 & -G_6 & H_4 & \end{bmatrix}$$

ここに、 h_2 は底部不透水面から淡塩境界までの高さを表す。

式 (23) の代数方程式を解くことで、左辺の未知境界量が決定される。ただし、全要素数 N は 98 とした。

こうして求められた自由境界上の $\partial\phi/\partial n$ を用いて、新たな境界形状、たとえば淡塩境界面は運動学的条件式 (14) を差分化した式

$$h_2^{m+1} = h_2^m - \frac{\Delta t k}{\cos\theta^m} \left\{ \beta \left(\frac{\partial\phi_1}{\partial n} \right)^{m+1} + (1-\beta) \left(\frac{\partial\phi_1}{\partial n} \right)^m \right\} \dots\dots\dots (24)$$

により決定される。ここに、 m : 時間ステップ、 Δt : 時間間隔、 β : 重み関数 ($\beta=0.4\sim 0.6$) を表す。

以上の計算手順を繰り返すことにより、自由表面の経時変化や塩水くさびの前進・後退過程が逐次決定できる。

さらに、地下空洞からの湧水量の経時変化は、それぞれの時刻で地下空洞境界(境界②)における各時間ステップごとのピエゾ水頭の法線微分値 $\partial\phi/\partial n$ と透水係数の積を空洞潤辺にわたり積分することにより求められる。

(5) 解析上の注意点

a) 特異点処理

BIEM では特異点処理が重要な問題であり、本論で扱うような 2 つの移動境界が相互に強く影響しあう場合には特に注意を払う必要がある。特異点処理法を Fig. 6 に示した特異点近傍の局所座標系に従って説明する。その基本は、まず特異点付近では要素を細かく分割し、その上で特異点に接する要素 3 の ϕ および $\partial\phi/\partial n$ から二次の多項式として推量することにある。これより、 ϕ の空間分布を表わせば次式のように書ける。

$$\phi = as^2 + bs + c \dots\dots\dots (25)$$

ここに、 s は要素 3 の中央点から 3 つ離れたそれ (要素 0) を基準として要素に沿った長さを表す。 a , b , c は定数であり、その値は次式による。

$$\left. \begin{aligned} \phi = \phi_0 & : s = 0 \\ \phi = \phi_1 & : s = s_1 \\ \phi = \phi_2 & : s = s_2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (26)$$

式 (25) は要素 0~2 ではすでに近似解 $\phi_0 - \phi_2$ が得られたことを意味する。式 (26) を式 (25) に代入することにより ϕ_3 は次のように書ける。

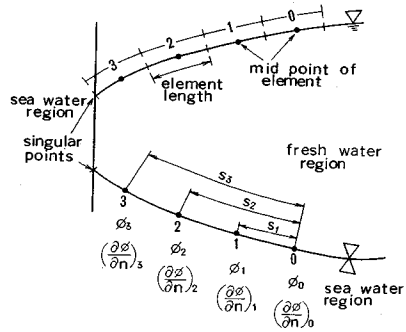


Fig. 6 Local coordinate system near singular points.

$$\phi_3 = as_3^2 + bs_3 + c \dots\dots\dots (27)$$

ここに、

$$\left. \begin{aligned} a &= \frac{(\Delta\phi_{01} + \Delta\phi_{12}) s_1 - \Delta\phi_{01} s_2}{(s_1 - s_2) s_1 s_2} \\ b &= \frac{(\Delta\phi_{01} + \Delta\phi_{12}) s_1^2 - \Delta\phi_{01} s_2^2}{(s_1 - s_2) s_1 s_2} \\ c &= \phi_0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (28)$$

一方、 $(\partial\phi/\partial n)_3$ についても ϕ_3 と同様にして求めること次のようになる。

$$(\partial\phi/\partial n)_3 = a' s_3^2 + b' s_3 + c' \dots\dots\dots (29)$$

ここに、

$$\left. \begin{aligned} a' &= \frac{(\Delta\phi_{m01} + \Delta\phi_{m12}) s_1 - \Delta\phi_{m01} s_2}{(s_1 - s_2) s_1 s_2} \\ b' &= \frac{(\Delta\phi_{m01} + \Delta\phi_{m12}) s_1^2 - \Delta\phi_{m01} s_2^2}{(s_1 - s_2) s_1 s_2} \\ c' &= (\partial\phi/\partial n)_0 \\ \Delta\phi_{m01} &= (\partial\phi/\partial n)_0 - (\partial\phi/\partial n)_1 \\ \Delta\phi_{m12} &= (\partial\phi/\partial n)_1 - (\partial\phi/\partial n)_2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (30)$$

b) 複数移動境界の接点の決定法

移動境界同士が互いに接する点をモデル化したものが Fig. 7 であり、図中の点 A は上述のレジーム ㉑ における淡水自由水面、淡塩水界面、海水自由水面の接点に対応する。移動境界上の接点は運動学的条件から決定されなければならない。まず、3 つの移動境界 (S_1 , S_2 , S_3) 上の要素のうち点 A に最も近い 2 点 (図中○印) 間を直線近似し、各直線の交点 (図中・印) を求める。次に求められた各交点の座標 $a_1 (x_1, y_1)$, $a_2 (x_2, y_2)$, $a_3 (x_3, y_3)$ をもとに三角形 $a_1 a_2 a_3$ の近似的重心位置座標を求める。よって、点 A の座標 (x_A, y_A) は次のように表わせる。

$$x_A = \frac{1}{3} (x_1 + x_2 + x_3), \quad y_A = \frac{1}{3} (y_1 + y_2 + y_3) \dots\dots\dots (31)$$

c) 断層がある場合

実際の岩盤地山では断層や亀裂帯のように地山の地質

学的性質が大きく異なる部分が局所的に存在することがままある。通常、地山の変形などを考慮しないとすれば、水理解析上は透水係数等を変えるのみでも十分表現可能である。しかし、断層があると流れが大きく変化し、同時に水面形、界面形成にも影響を与えるため、BIEMの境界条件取扱いにあたって注意を要することになる。Fig. 8に地山内に断層があるような場合を想定し、その対応を簡単に述べる。断層より陸側の自由水面 ab は空洞からの湧水のため、海側のそれ ce に比べて低下が促進され、断層部の仮想自由水面 $c'd$ より下方 (b') に位置することになる。ここで、水面 $c'd$ は実際には $c'b'$ 面に近いと思われるが、計算の都合上仮想面 $c'd$ をとる。その際、 $b'd$ 部分は浸出面として新たな境界となる。したがって、式 (23) 中のマトリックスは組み換えを必要とすることになり、点 b' と d の上下関係を逐次判定しつつ計算を進めることになる。

3. 実験

ここで、2. で述べた BIEM による解析結果の妥当性を確かめると同時にその現象を可視化・再現するために次の室内実験を試みる¹¹⁾

(1) 実験装置と実験方法

実験装置は、ヘル・ショウモデルであり、Fig. 9 (a) にその詳細を示す。地山に対応する透水部は長さ 1.68 m、高さ 0.93 m で平行間隙幅は 1 mm であり、そのの

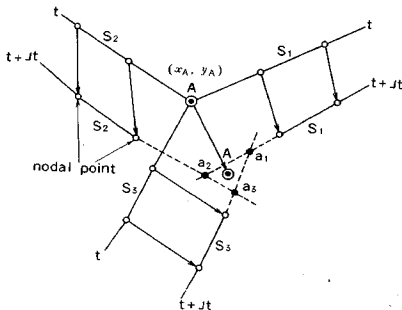


Fig. 7 Determination of a nodal point A on three moving boundaries, S_1 , S_2 and S_3 .

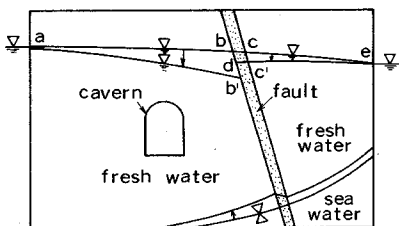


Fig. 8 Model of underground cavern in non-uniform rock ground.

左側が淡水域、右側が塩水域である。地下空洞 (幅 0.06 m、高さ 0.12 m) は、中央に 3 連設置し、空洞部には同形の蓋を取り付け、単設と連設の区別をする (Fig. 9 (b) 参照)。空洞からの湧水量は空洞の前方に作られた導油トラフから直接滴下させ、メスシリンダーで測る。地山境界水位の調整は、左右のオーバーフロータンクの高さを変えることにより行い、不透水層までの深さ調整は軟らかいゴム (Oリング、外形 2 mm) を圧着させることにより行う。

実験手順は、まず、不透水層となる軟らかいゴムを設定し、装置の右のオーバーフロータンクにより塩水域の水位を一定にし、他方の淡水側の水位を種々変えて自然状態の下で定常流を作り、このときの水面形、くさび形状、流量を測定する。次に、空洞前面の蓋 ((b) 図参照) を除去し、湧水量、淡塩界面 (写真撮影) を経時的に測定する。Table 2には、今回の実験ケース (Fig. 3の記号に対応している) と自然状態の下での初期塩水くさびの条件を示した。

実験に使用した流体は、淡水に相当するものとしてエンジンオイル (油温 21 °C で動粘性係数 $\nu = 5.286 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ 、比重 $\gamma = 0.886$)、一方塩水には同じくオイル ($\nu = 5.286 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$) にベンガラ赤色微粉末を加えて比重 $\gamma_2 = 0.907 \sim 0.917$ とした。今回の実験では地山への降雨浸透がない場合を行い、実験はすべて恒温室 (21 °C) で行われた。

(2) 実験結果とその考察

Table 2 に示した実験条件に従って、地下密度流実験を行い、淡塩界面の経時変化を測定したわけであるが、これらの代表的な結果を提示しつつその基本的性質を吟味してみることにする。

一連の実験の中で、Photo 1, 2 は単設および連設空洞における淡塩界面および自由表面の変化の 4 例を経時的に示したものである。Photo 1 は、単設空洞の Exp-1-3 における (a) 初期状態、(b) 17 分後、(c) 41 分後のそれをおのおの示している。実験開始前は淡塩界面は Herzberg 条件を満足し、定常くさび形状を表わしているが、空洞掘削後は徐々に空洞側に移動していくことになる。Photo 2 は連設空洞の Exp-2-3 における

Table 2 Experimental cases and conditions. (Notations are the same with Fig. 3)

cavern model	Cases	ρ_1 (kg/m ³)	ρ_2 (kg/m ³)	ϵ	k (m/s)	H_1 (m)	H_2 (m)	Z_0 (m)	L' (m)	h_{10} (m)	experiments by fresh water
single cavern	Exp-1-1	886	917	0.0350	1.55×10^{-3}	0.306	0.235	0.30	0.10	0.42	○
	Exp-1-2	"	907	0.0237	"	0.278	"	"	0.30	0.235	○
	Exp-1-3	"	913	0.0305	"	0.265	"	"	0.51	0.10	—
3-series caverns	Exp-2-1	"	917	0.0350	"	0.306	"	"	0.12	0.40	—
	Exp-2-2	"	910	0.0271	"	0.278	"	"	0.265	0.265	○
	Exp-2-3	"	917	0.0350	"	0.265	"	"	0.54	0.105	○

$$\epsilon : \epsilon = (\rho_2 - \rho_1) / \rho_1$$

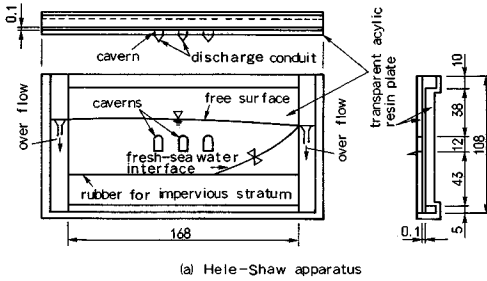


Fig. 9 System of experimental apparatus. (unit : 10⁻² m)

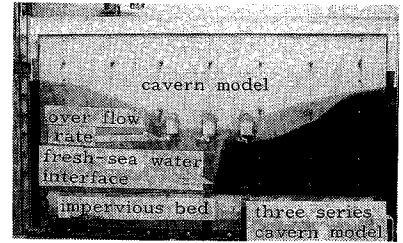
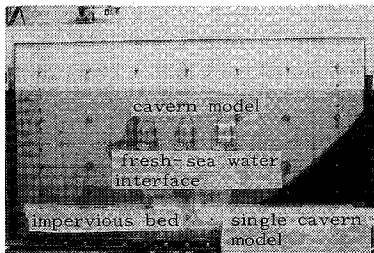


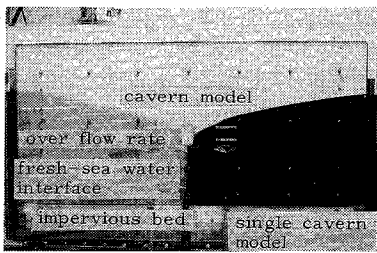
Photo 2 Moving fresh-sea water interface and free surface after 11.0 minutes for Exp-2-3.



(a) initial condition



(b) after 17.0 minutes



(c) after 41.0 minutes

Photo 1 Moving fresh-sea water interface and free surface change with time for Exp-1-3.

11分後のそれを示しているが、単設のそれ（後述の Fig. 10 (c) を参照）に比べて塩水はやや早く空洞に流入している。

次に、Fig. 10, 11 は一連の写真から読み取ることによって得られた淡塩界面および自由表面の経時変化を示したものである。図中の \bar{t} は、塩水が空洞に到達するに要した時間を示している。Fig. 10 は単設空洞における Exp-1-1~1-3 のそれであるが、自由表面はいずれも

10分程度ではほぼ定常状態に至っている。一方、淡塩界面は自然状態では陸側境界の淡水水位の最も低い Exp-1-3 において帯水層に大きく侵入している。空洞の蓋を抜いた後はいずれもそれが空洞側へ移動し、空洞に近くなると不透水層上にある界面は、分離流線よりやや右側でいったん停止したようになり、その後急速に空洞底面へ向かって上昇する。塩水侵入は、まず空洞底面より始まり、しばらくの間空洞底面のみから生じる。この過程で、界面は下に凸形である。その後、さらに塩水は空洞側面からも流入するようになり、この時点では右側帯水層のほとんど全域が塩水で占められることになって、最終的に右側半分の帯水層が完全に塩水化する。定常状態に至るのに、数十分を要している。また、空洞直下の界面に着目すると、いったん停止したかにみえた界面はさらに左方へ移動し、不透水層上の界面先端は最終的には分離流線（空洞中央を境に流れを分ける流線）をやや越え空洞左端直下あたりで止まるといった性質が認められる。次に、Fig. 11 は、連設空洞 Exp-2-3 における淡塩界面の経時変化を示したものであるが、基本的には単設の場合と類似した性質となる。ただし、初期自然状態での淡塩界面は、単設の場合に比べて空洞が海域に近いので、塩水は空洞底面より侵入するが比較的早期に側面からも流入するようになる。また、その中央空洞への侵入は、右端空洞へ侵入後比較的早期に生じている。

Fig. 12 は、単設 Exp-1-3 における空洞湧水量の経時変化を示したものである。図中には塩水侵入のない淡水のみの場合も同時に載せてあるが、両者の湧水量はほとんど一致した傾向をもち、指数で減していることが確認できる。つまり、空洞掘削による湧水量は塩水侵入の有無にあまり影響を受けていないことになる。空洞湧水量 q の減曲線式は

$$\left(\frac{q}{kB}\right) = a \cdot \exp\left(-b \frac{kt}{\lambda B}\right) + c \dots \dots \dots (32)$$

の形となる。ここに、 a, b, c : 定数、 B : 空洞幅、 t : 時間、 k : 地山透水係数、 λ : 空隙率である。Fig. 12 の実験結果では $a=5.0, b=0.208, c=3.40$ となって

いる。

ここで述べた淡塩界面の挙動は、陸側上流境界水位と海域の水位差が30~71 mmの実験におけるものであって、この水位差が大きく、かつ降雨浸透が大きい場合には淡塩界面が空洞へ到達するとは限らない。つまり、今回の実験結果が実際の地山でそのまま常にあてはまると

はいえないが、陸側境界水位、海域水位、空洞の深さ、降雨浸透量、空洞の規模によって現象的に塩水化の可能性はある。

4. 実験結果と解析の比較・検討

地下空洞建設に伴う地下塩水くさびの非定常挙動、その特性および降雨浸透量が地下密度流に及ぼす影響を実験結果と解析のそれを比較・検討する。

Fig. 13は、実験結果 Exp-1-3の場合における地山自由水面と淡塩くさびの形状に関し、実験結果と解析結果を比較したものであって、経過時間ごとに変化を示したものである。地山内で全体的には自然状態において地下水は陸側から海に向かって流れ、定常自由水面と塩水くさびを形成しているが、空洞を建設すると自由水面は空洞直上から低下し、塩水くさびは陸側へ徐々に進行する。時間とともに自由水面と塩水くさびは上述したレジーム①から④の過程を経る。実験結果と理論のそれを比較すると局所的に不整合の部分もあるが、計算値は淡塩水の挙動を再現していると考えられる。上述の Fig. 12にはこの場合における空洞への無次元湧水量と無次元時間の関係を同時に示してあるが、これも実験とBIEMの解析結果はよく整合しているといえよう。また、湧水量のてい減曲線は式(32)に示したように、時間とともに指数で減っていることが明確である。結果的に境界方程式法のこの種の現象への適用性が十分に確認されたものと考えられる。

次に、もう少し実際に近い地山規模における自由表面と淡塩界面の挙動について検討を加えるために、Fig. 14のように長さ $L=3000\text{ m}$ 、地山上下流境界水位 $H_1=495\text{ m}$ 、 $H=0.92 H_1$ の場合について自由表面と淡塩界面の挙動を解析した結果である。また、この場合における空洞直上の自由表面の水位低下量 h_L (=初期水位-任意時間における水位)と空洞、地山境界の流量のヒドログラフをそれぞれ Fig. 15に示してある。空洞からの湧水量は2連空洞の場合にはわずかに陸側の方で大きい。また h_L/D は時間とともに急に低下し、やがて一定値に近づく。さらに、Fig. 15に示した空洞および地山境界での

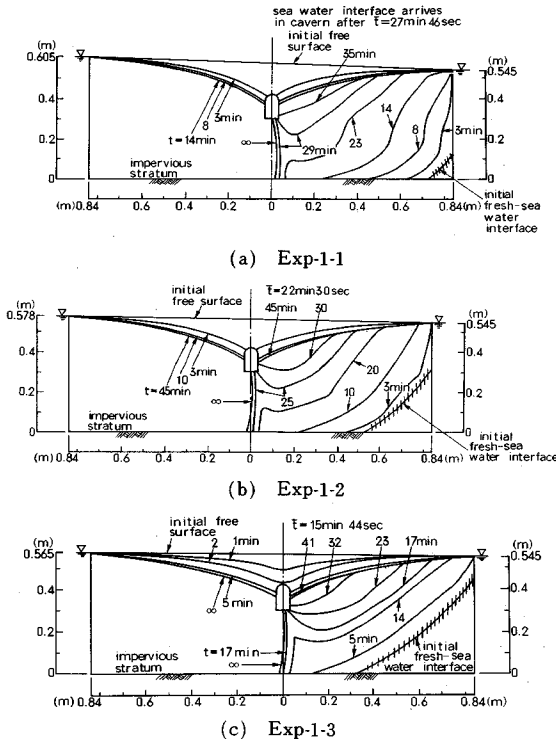


Fig. 10 Moving fresh-sea water interface and free surface change with time for a single cavern.

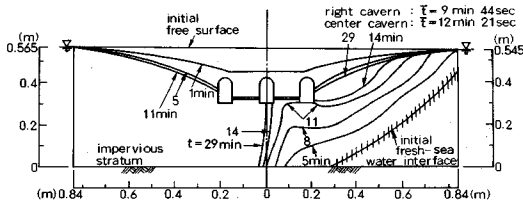


Fig. 11 Moving fresh-sea water interface and free surface change with time in the case of Exp-2-3 with 3-series caverns.

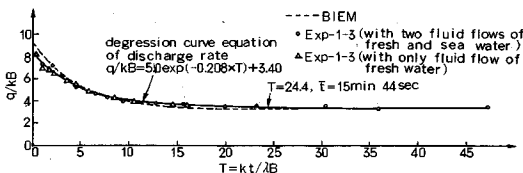


Fig. 12 Non-dimensional discharge q/kB with time in the case of Exp-1-3.

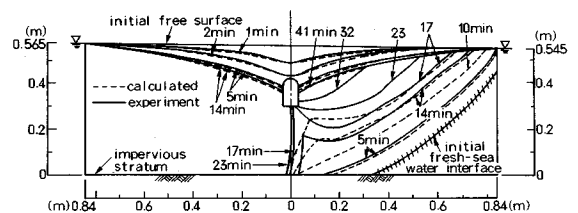


Fig. 13 Change of free surface and fresh-sea water interface with time.

流量成分が経時的にどう変わるかはつきり知ることができる。

一方、地山の水文的水収支式は、空洞の地下水特性を知るうえで非常に大切となるが、基本的に

$$\frac{dS_0}{dt} = q_w + q_l - q_o - q \dots\dots\dots(33)$$

となる。ここに、 q_w : 降雨浸透量、 q_l : 上流側境界流入量、 q_o : 下流側流出量、 q : 空洞湧水量、 S_0 : 地山内の貯留量とする。この場合、 $q_w/kB=16.2$ となり、Fig. 15 との比較により、十分時間を経ると式 (33) は次のように近似できる。

$$\frac{dS_0}{dt} \approx q_w - q \dots\dots\dots(34)$$

空洞建設によって一時的に $dS_0/dt < 0$ となるが、 dS_0/dt は時間とともに降雨浸透量と空洞湧水量の差に依存するようになることが明快に知れる。この意味で Fig. 15 に示した一連の成分ハイドログラフは興味深いものと思われる。

次に、地山内に断層があるときの単設空洞周辺の地下水と淡塩界面挙動について述べる。Fig. 16 は断層があるときとないときのそれをレジーム①についてのみ示したものである。断層は幅 $B_f/B=0.91$ 、傾斜角 $\theta_f=66^\circ$ 、

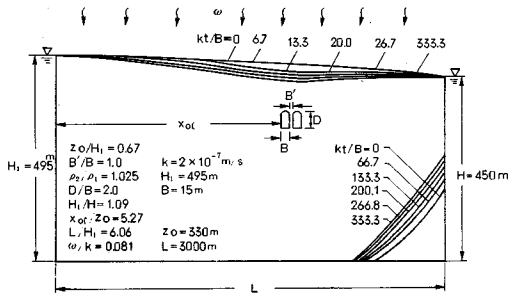


Fig. 14 Change of free surface and fresh-sea water interface with time.

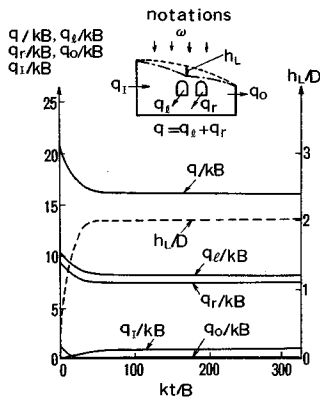
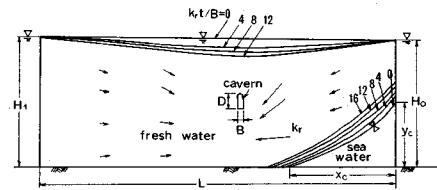
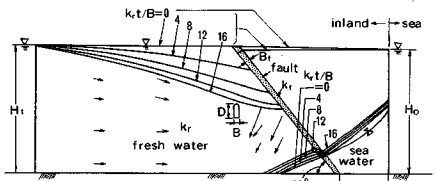


Fig. 15 Hydrographs, their discharge components and change of draw down depth with time at the top of cavern.

透水係数 $k_f/k_r=100$ とし、初期状態より塩水くさび中を走っているものとする。これより、断層があると空洞側の自由水面の低下が著しく大きくなるものの、塩水くさびの進行はそれのないときと有意な差はないことが認められる。これは、流速ベクトルが断層両端での水面差の影響から空洞右側において下向き成分が卓越してくることによる。一方、Fig. 17 はこの場合の空洞湧水量および各壁面よりの湧水量成分を示したものである。同図より、空洞湧水量 q_l/k_rB は、断層がないと経時的にゆるやかに減少するが、それがあると大きく低下することが認められる。これを湧水成分別にみると、断層が



(a) uniform rock ground (case-A)



$v/k_r=1.0$
 $y_c/H_0=0.5$ $k_f/k_r=0.01$ $H_1/H_0=1.046$
 $x_c/L=0.304$ $B_f/B=1$ $L/H_1=2.98$
 $x_1/L=0.182$ $D/B=2$
 k_r : permeability of rock
 k_f : permeability of fault

(b) non-uniform rock ground (case-B)

Fig. 16 Change of groundwater flow in non-uniform rock ground.

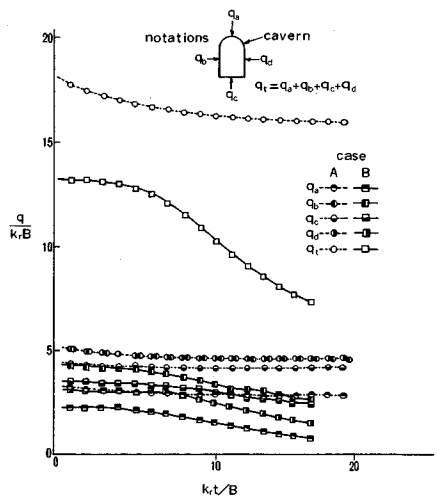


Fig. 17 Change of nondimensional flow rate components with time.

ないときの湧水量は空洞上および両側壁の q_a , q_b , q_c がほぼ同じ値をもつが、断層があると側壁の q_b , q_c に差が生じてくることになる。ただ、成分別の湧水低下傾向には大きな差はない。結局、地山内に断層があると空洞湧水、塩水くさび挙動に大きく影響を与える可能性があるわけで、空洞への海水進入予測にあたって無視できない存在であることが示唆される。

5. 結 論

本研究では、非定常淡塩界面の解析にBIEMを応用し、解析結果とヘル・ショウ実験結果の比較・検討を加えた。その結果、次のことが明らかになった。

(1) 境界積分方程式法は淡塩界面の非定常解析にうまく応用し得ることがわかった。非定常現象であるため界面の動態変化に対応して境界条件に計算上工夫を要する。

(2) 地山空洞における自由水面低下、および湧水量の経時変化は時間とともに指数で減し、淡塩くさびの侵入は地山帯水層の上下流水位差に加えて降雨浸透強度に依存・応答する。

(3) 淡塩くさびは地山帯水層の上下流水位差が小さい場合には、BIEMの適用にあたって、侵入くさびの経時変化に伴って解析領域と動界面の座標系の設定に工夫を要す。

(4) 臨海岩盤空洞への塩水くさびは空洞建設に伴って徐々に侵入するが、内陸の地下水位が高い場合には空洞へ塩水くさびは達しない。

(5) 地山内に断層があると空洞周辺の地下水流や淡塩界面挙動に大きな影響を及ぼす可能性があり、空洞への海水進入予測にあたって注意を要する。

最後に、本研究は水理解析技法の軽量化を目指して進められ、これらの計算がパーソナルコンピュータでも十分処理できるようになったことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 河野伊一郎ほか：飽和不飽和浸透流における非定常塩化現象の有限要素法解析，土木学会論文集，第331号，pp.133～141，1983.
- 2) 柿沼忠男ほか：海岸地下水における淡塩水境界面モデルと分散モデル，日本地下水学会誌，第27巻，pp.141～155，1985.
- 3) 榎井和朗ほか：不飽和域を考慮した海岸自由地下水の塩水の侵入・分散の数値解析，日本地下水学会誌，第28巻，pp.103～112，1986.
- 4) Liggett, J.A. : Location of free surface in porous media, J. of Hydraulics Div., ASCE, Vol. 103, HY4, pp.353～365, 1977.
- 5) Liu, P. L-F. and Liggett, J. A. : Boundary solution to two problems in porous media, J. of Hydraulics Div., ASCE, Vol. 105, HY3, pp.171～183, 1979.
- 6) Lennon, G.P. et al. : Boundary integral equation solution to axisymmetric potential flows, 2. Recharge and well problems in porous media, Water Resour. Res., Vol. 15, No. 5, pp.1107～1115, 1979.
- 7) 山上拓男・岡田洋志：非定常自由水面問題への境界要素法の一適用例，土木学会論文報告集，第336号，pp.113～119，1983.
- 8) Liu, P.L-F. et al. : Boundary integral solutions to moving interface between two fluids in porous media, Water Resour. Res., Vol. 17, pp.1445～1452, 1981.
- 9) 藤野和徳：境界要素法による地下密度流の数値解析および遮水壁の塩水侵入抑制の効果について，日本地下水学会誌，第27巻，pp.51～60，1985.
- 10) Taibbenu, A.E. and Liggett, J.A. : Boundary integral solution to seawater intrusion into coastal aquifers, Water Resour. Res., Vol. 20, No. 3, pp.1150～1158, 1984.
- 11) 伊藤 洋ほか：地下空洞建設に伴う地下密度流に関する実験的研究，土木学会第38回年次学術講演概要集，第2部，pp.31～32，1983.9.

(1986.6.23・受付)