

## (9) 亀裂情報を利用したクロスホール法による岩盤の三次元透水パラメータの測定法

|                     |     |           |
|---------------------|-----|-----------|
| 岡山大学大学院 (備CRC総合研究所) | 正会員 | ○ 中 屋 眞 司 |
| 岡山大学工学部             | 正会員 | 西 垣 誠     |
| 岡山大学工学部             | 正会員 | 河 野 伊 郎   |

A new field measurement method for determination of the three-dimensional hydraulic parameters of rock mass exploited fissure informations by using cross-hole method

Shinji NAKAYA, Okayama University (& CRC Res. In, Inc.)  
Makoto NISHIGAKI Okayama University  
Iichiro KOHNO Okayama University

### ABSTRACT;

We will propose a new method for determination of the three-dimensional hydraulic parameters of fissured rock mass. Two boreholes drilled in rock mass, where constant volume of water is injected from one borehole, and change of water head in a packed-off interval in the other is monitored. Data of fissure orientation are sampled from boreholes. Permeability of a rock mass is expressed as an anisotropic hydraulic conductivity tensor of hydraulically and geostatistically equivalent porous media. The tensor is calculated according to a theory of crack tensor using *in situ* fissure informations. Three-dimensional hydraulic conductivity tensor and specific storage are estimated from non-linear least square iteration method of the observed and the theoretical curves. The theoretical curve is calculated from Hsieh's three-dimensional theory of transient seepage flow in a homogeneously and anisotropically porous media. Finite element analyses of three-dimensional seepage for cross-hole test were applied to two kinds of rock mass models for checking the reliability of our method. Observed change of water head with time obtained from three-dimensional finite element analysis and given fissure orientation are applied to our method. Obtained values of hydraulic conductivity tensor and specific storage are accurate enough for practical application.

### 1. はじめに

岩盤ブロックをそれと等価な均質で異方性をもつ多孔質媒体と仮定すれば、透水係数テンソルと比貯留係数でブロックの透水性が評価される。著者ら<sup>1)</sup>は三次元透水係数テンソルを決定するため、三種類のシングル法による透水試験法を提案している。しかし、定常法であるため、比貯留係数を決定できない。

本研究では、原位置の亀裂情報から水理学的、地質統計学的手法を用いて透水係数テンソルを評価した後、二本のボーリング孔に限定したクロスホール透水試験から得られる観測値を用いて亀裂の発達した岩盤の三次元透水係数テンソルと比貯留係数を決定する新しい方法を提案する。

### 2. 透水パラメータの決定手順

新しい方法による透水パラメータの決定の手順を示すと以下ようになる。

(1) パッカーを用いて一方のボーリング孔内に注水区間を設け、他方に3箇所の観測区間を作成し、一定量

の注水による二孔間の透水試験を実施して水頭の経時変化を観測する。

- (2) 岩盤をそれと等価で均質な異方性多孔質透水媒体と考え、ボーリング孔内の亀裂調査から得た亀裂方位を既知データとし、亀裂開口幅データを仮定して水理学的、地質統計学的手法を用いて透水係数テンソルを評価、算定する。
- (3) 評価した透水係数テンソルをもつ多孔質媒体内で実施したクロスホール透水試験で生じる水頭の経時変化を、三次元浸透理論から求める。
- (4) 理論的に求められた水頭の経時変化は、観測値との間に種々の仮定に由来する誤差を持つ。そこで非線形最小二乗法を用いて各観測値と計算値の残差の平方和が最小となるまで、水理学的等価亀裂開口幅と比貯留係数を反復修正し、三次元透水係数テンソルと比貯留係数を決定する。

このような推定法は、クラックや節理等の亀裂が発達した岩盤ブロックだけでなく、層理面、葉理面、片理面等の地質学的面構造の発達した岩盤や未固結堆積層等の透水性を求める場合にも有効となる。

### 3. 透水パラメータの推定法の基礎

#### (1) 透水係数テンソルの水理、地質統計学的評価

岩盤内の亀裂を直径  $r$ 、開口幅  $t$  の円盤でモデル化すると、その方位は円盤に立てた法線の単位ベクトル  $n$  で表すことが出来る。亀裂の幾何形状データよりクラックテンソル  $P_{ij}$  は Oda(1985)<sup>2)</sup> によると、次式で定義される。

$$P_{ij} = \langle t^3 \rangle N_{ij} \frac{N(u)}{b \langle |n \cdot u| \rangle} \quad (1)$$

$$\langle t^3 \rangle = \int_0^\infty t^3 g(t) dt, \quad N_{ij} = \int_\Omega n_i n_j E(n) d\Omega$$

ここに、 $g(t)$  は亀裂開口幅の確率分布密度、 $E(n)$  は亀裂方位の確率分布密度、 $\Omega$  は立体角である。式(1)で示される  $P_{ij}$  は亀裂方位データのクラスター分析の結果分れたグループ毎に計算し、最後に総和して式(2)に代入して、異方透水係数テンソル  $k_{ij}$  を決定する。

$$k'_{ij} = \lambda (P'_{kk} \delta_{ij} - P'_{ij}), \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (2)$$

ただし、 $P'_{ij} = (1 - \alpha_0) P_{ij}$  で定義される二階の対称テンソルであり、水の浸透に有効な亀裂の幾何学性を表している。ここに、 $\lambda$  は亀裂の連結の程度を表す未知定数で、 $\lambda \leq 1/12$  である。 $\alpha_0$  は  $0 < \alpha_0 < 1$  で、1から次第に減少させていき、透水性が実質的に零となるときの値を持って  $\alpha_0$  とする。

クラックテンソル理論から透水テンソルの決定に必要な亀裂情報は亀裂分布密度、水理学的開口幅、方位および亀裂関連度である。ここで、Fig.1 に示すように、亀裂データはボーリング孔からサンプリングする。ボーリング孔から得られる亀裂の方位データについては信頼性の面から、クラックテンソルのための統計計算に直接用いた。開口幅データについてはボーリング孔からサンプリングしても、水理学的開口幅として評価できない。亀裂関連度  $\lambda$  についてはほとんど情報が得られない。式(1)と式(2)から明らかなように、 $k_{ij}$  の決定に対して、 $t$  と  $\lambda$  は連動しており、分離して評価するのは困難である。また、 $k_{ij}$  と  $S_s$  を推定する目的であるた

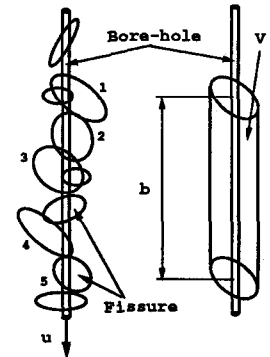


Fig.1 Sampling of fissure in a each group across a bore-hole

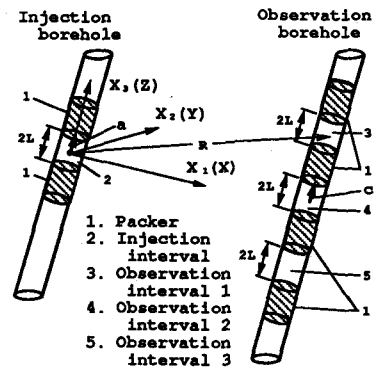


Fig.2 Cross-hole test

め、 $t$  と  $\lambda$  の両者を分離して考える必要はない。そこで、 $\lambda$  は  $1/12$  以下の任意の定数とおき、 $t$  のみを評価する。従って、 $t_m$  は  $\lambda$  を任意の既知定数とした時に限った値となるため、本手法で評価する  $t_m$  は、水理学的平均等価亀裂開口幅  $t_e$  (以下、等価亀裂開口幅) と呼ぶ。

## (2) クロスホール透水試験と非定常浸透理論

Fig. 2にクロスホール透水試験の概念を示す。パッカーを用いてボーリング孔の一方に注水区間を作り、他方に水頭の測定のための観測区間を作る。水理学的に均質で異方性を持つ多孔質透水媒体内の三次元浸透はHsieh & Neuman (1985)<sup>3)</sup>により理論解が得られている。注水区間および計測区間を点と考えた場合、三次元浸透は次式により表わされる。

$$\Delta h = \frac{Q}{4\pi\sqrt{G_{xx}}} \operatorname{Erfc}\left(\frac{\sqrt{SsG_{xx}}}{\sqrt{4Dt}}\right) \quad (3)$$

ここに、 $G_{xx} = x^T A x = x_i x_j A_{ij}$ , ( $i, j=1, 2, 3$ )、 $A_{ij} = A_{ji} = k_{ik} k_{jk} - k_{ij} k_{kk}$ ,  $A_{ii} = k_{ji} k_{kk} - k_{ij}^2$ ,  $D = |k| = k_{11} k_{22} k_{33} + 2k_{12} k_{23} k_{31} - k_{11} k_{22} k_{33} - k_{22} k_{13}^2 - k_{33} k_{12}^2$ ,  $\operatorname{Erfc}()$ : 余誤差関数、 $x$ : 注水点を原点とした時の観測点の座標、 $\Delta h$ : 時間  $t$  のときの水頭と初期水頭の差である。実際には注水、計測両区間は点や線ではない。両者を線と仮定して導かれた理論解は、両区間を点と考えた式(3)の理論解で置き換えられることが既に示されている<sup>1)</sup>。

## (3) 非線形最小二乗反復法

今回用いた非線形最小二乗反復法は、修正マルカート法<sup>4)</sup>で、中屋・田中(1986)<sup>5)</sup>により、地下水の逆問題に適用され、透水パラメータの推定について吟味されている。修正マルカート法は、他の最小二乗反復法と同様に、観測値と式(3)から求めた計算値の重み付き残差平方和が最小となるような最適値を、与えた初期パラメータを反復修正して決定するニュートン法系の方法である。その際、探索の目的となるパラメータは(a) 比貯留係数  $Ss$ 、(b) 各グループの等価亀裂開口幅  $t_e$  である。原位置の亀裂データをその方位からクラスター分析した場合、通常、2~3のグループに分かれる。従って、探索パラメータの数は3~4となる。

## 4. 透水パラメータの推定

通常、方法論の妥当性は実験あるいは計算のいずれかまたは両方で確かめることになるが、予め透水性の知れた岩盤が得られないため、亀裂性岩盤の数値モデルを作成し、数値実験から本手法による岩盤の透水性の測定について検討した。亀裂性岩盤の数値モデルは、亀裂の分布密度、方位、水理学的開口幅および、亀裂連結度を仮定し、これらを基に透水テンソルについて前述のクラックテンソル理論から決定した。比貯留係数については、一般に報告されている値を与えた。岩盤モデルの物理定数をTable 1に示す。この

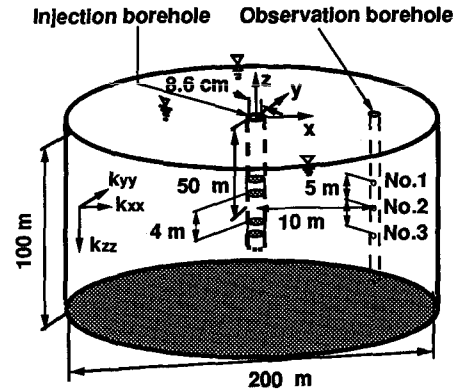


Fig. 3 Three-dimensional FEM model for cross-hole test.

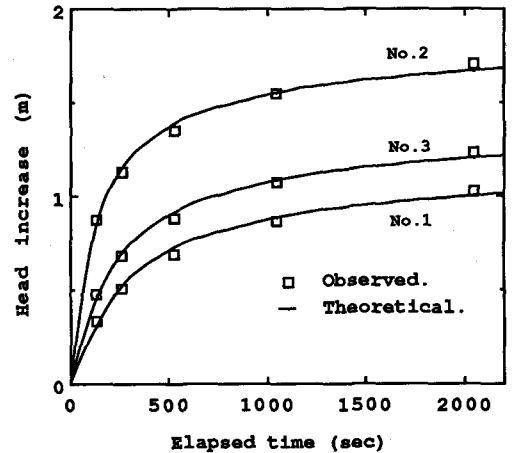


Fig. 4 Head increase versus elapsed time for Case 1-3.

段階で決定したモデル岩盤の透水テンソルと比貯留係数を両者の真の値と呼ぶ。岩盤モデルのクロスホール試験から得られる水頭の計測値は、決定した透水テンソルと比貯留係数を持つ異方性多孔質媒体にボーリング孔を作成した三次元モデルについて、三次元有限要素法<sup>6)</sup>を用いた非定常浸透解析から求めた。

クロスホール試験のための三次元有限要素モデルの概略をFig.3に示す。三次元メッシュの節点数と要素数は各々、2016、1664で、中央の注水のための深度100m、直径8.6cmのボーリング孔を中心として、円周方向に16分割、半径方向に9分割、深度方向に14分割した。FEM解析モデルの初期全水頭は全節点とも零とし、境界条件は外周面の全水頭を一定とした被圧状態で、注水区間に相当する節点に一定の流量を与えた。各岩盤モデルに対して1回の定流量注水試験を行ない、No.1～No.3の観測区間に当たる節点において水頭増分の経時変化を算出した。メッシュとしては少し粗いが、注水区間を点として導かれた式(6)の理論値とは、5%程度の誤差範囲内で一致していた。

クロスホール試験から得られる水頭の経時変化記録とボーリング孔からサンプリングされる亀裂データの内、亀裂の個数と方位のみを用いて、岩盤を三次元の水理学的異方性を持つ均質な多孔質媒体としたときの透水テンソル、および比貯留係数の推定を試みる。

岩盤モデルについて、観測区間数を1箇所、2箇所、3箇所と変更したケース1-1～1-3の3通りの

Table 1 Physical parameters of fissured rock mass model 1

| Physical parameters                                                  |                            |
|----------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| Principal hydraulic conductivity                                     |                            |
| $k_{xx}$ (m/sec.)                                                    | $8.25 \times 10^{-8}$      |
| $k_{yy}$ (m/sec.)                                                    | $7.03 \times 10^{-8}$      |
| $k_{zz}$ (m/sec.)                                                    | $1.31 \times 10^{-8}$      |
| Components (x,y,z) of unit vector, p for principal axes.             |                            |
| p1 for $k_{xx}$ -axis                                                | ( 0.988, -0.143, -0.0523 ) |
| p2 for $k_{yy}$ -axis                                                | ( 0.0811, 0.784, -0.615 )  |
| p3 for $k_{zz}$ -axis                                                | ( 0.129, 0.604, 0.787 )    |
| Specific storage, $S_s$ (1/m)                                        | $1 \times 10^{-7}$         |
| Connection parameter, $\lambda$ in Eq. (3)                           | 0.01                       |
| Mean aperture of fissures belonged to each group                     |                            |
| $ta_1$ ( for group 1 ) ( $\mu$ m)                                    | 48                         |
| $ta_2$ ( for group 2 ) ( $\mu$ m)                                    | 1                          |
| $ta_3$ ( for group 3 ) ( $\mu$ m)                                    | 45                         |
| Mean strike/dip (deg.) and total number of fissures                  |                            |
| ( for group 1 )                                                      | N80W40N / 40               |
| ( for group 2 )                                                      | N60W65N / 19               |
| ( for group 3 )                                                      | E W35S / 10                |
| Strike/dip (deg.) direction and length of fissure sampling bore-hole | NS 0E / 50 (m)             |

Table 2(b) Result of parameter estimation for fissured rock mass model 1 (case 1-2)

| Physical parameters                                                            | Initial | Final                       |
|--------------------------------------------------------------------------------|---------|-----------------------------|
| Principal hydraulic conductivity                                               |         |                             |
| $k_{xx}$ (m/sec.)                                                              | -       | $9.50[8.25] \times 10^{-8}$ |
| $k_{yy}$ (m/sec.)                                                              | -       | $10.3[7.03] \times 10^{-8}$ |
| $k_{zz}$ (m/sec.)                                                              | -       | $1.02[1.31] \times 10^{-8}$ |
| Components (x,y,z) of unit vector, p for principal axes.                       |         |                             |
| p1 for $k_{xx}$ -axis                                                          | -       | ( 0.890, -0.319, 0.326 )    |
| p2 for $k_{yy}$ -axis                                                          | -       | ( 0.988, -0.143, -0.0523 )  |
| p3 for $k_{zz}$ -axis                                                          | -       | ( 0.456, 0.630, -0.629 )    |
|                                                                                |         | ( 0.0811, 0.784, -0.615 )   |
|                                                                                |         | ( 0.00, 0.708, 0.706 )      |
|                                                                                |         | ( 0.129, 0.604, 0.787 )     |
| Specific storage, $S_s$ (1/m) $1 \times 10^{-5}$                               |         | $1.58[1] \times 10^{-7}$    |
| $\lambda$ in Eq. (3)                                                           | 0.004   | -                           |
| Equivalent aperture of fissures belonged to each group                         |         |                             |
| $ta_1$ (for group 1) ( $\mu$ m)                                                | 100     | 67.4                        |
| $ta_2$ (for group 2) ( $\mu$ m)                                                | 100     | 50.2                        |
| $ta_3$ (for group 3) ( $\mu$ m)                                                | 100     | .186                        |
| Residual square sum                                                            |         | $5.68 \times 10^{-2}$       |
| Maximum number of iteration                                                    |         | 71                          |
| { }; True value, Injected volume $Q: 8 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{sec.}$ |         |                             |

Table 2(a) Result of parameter estimation for fissured rock mass model 1 (case 1-1)

| Physical parameters                                                            | Initial | Final                        |
|--------------------------------------------------------------------------------|---------|------------------------------|
| Principal hydraulic conductivity                                               |         |                              |
| $k_{xx}$ (m/sec.)                                                              | -       | $21.6[8.25] \times 10^{-8}$  |
| $k_{yy}$ (m/sec.)                                                              | -       | $21.1[7.03] \times 10^{-8}$  |
| $k_{zz}$ (m/sec.)                                                              | -       | $0.484[1.31] \times 10^{-8}$ |
| Components (x,y,z) of unit vector, p for principal axes.                       |         |                              |
| p1 for $k_{xx}$ -axis                                                          | -       | ( 0.943, 0.272, 0.190 )      |
|                                                                                |         | ( 0.988, -0.143, -0.0523 )   |
| p2 for $k_{yy}$ -axis                                                          | -       | ( -0.332, 0.772, 0.541 )     |
|                                                                                |         | ( 0.0811, 0.784, -0.615 )    |
| p3 for $k_{zz}$ -axis                                                          | -       | ( 0.00, -0.574, 0.819 )      |
|                                                                                |         | ( 0.129, 0.604, 0.787 )      |
| Specific storage, $S_s$ (1/m) $1 \times 10^{-5}$                               |         | $3.52[1] \times 10^{-7}$     |
| $\lambda$ in Eq. (3)                                                           | 0.004   | -                            |
| Equivalent aperture of fissures belonged to each group                         |         |                              |
| $ta_1$ (for group 1) ( $\mu$ m)                                                | 100     | 17.3                         |
| $ta_2$ (for group 2) ( $\mu$ m)                                                | 100     | 25.9                         |
| $ta_3$ (for group 3) ( $\mu$ m)                                                | 100     | 154.                         |
| Residual square sum                                                            |         | $2.85 \times 10^{-2}$        |
| Maximum number of iteration                                                    |         | 96                           |
| { }; True value, Injected volume $Q: 8 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{sec.}$ |         |                              |

Table 2(c) Result of parameter estimation for fissured rock mass model 1 (case 1-3)

| Physical parameters                                                            | Initial | Final                       |
|--------------------------------------------------------------------------------|---------|-----------------------------|
| Principal hydraulic conductivity                                               |         |                             |
| $k_{xx}$ (m/sec.)                                                              | -       | $8.43[8.25] \times 10^{-8}$ |
| $k_{yy}$ (m/sec.)                                                              | -       | $7.83[7.03] \times 10^{-8}$ |
| $k_{zz}$ (m/sec.)                                                              | -       | $1.28[1.31] \times 10^{-8}$ |
| Components (x,y,z) of unit vector, p for principal axes.                       |         |                             |
| p1 for $k_{xx}$ -axis                                                          | -       | ( 0.981, 0.0957, -0.171 )   |
|                                                                                |         | ( 0.988, -0.143, -0.0523 )  |
| p2 for $k_{yy}$ -axis                                                          | -       | ( -0.185, 0.747, -0.639 )   |
|                                                                                |         | ( 0.0811, 0.784, -0.615 )   |
| p3 for $k_{zz}$ -axis                                                          | -       | ( 0.668, 0.658, 0.750 )     |
|                                                                                |         | ( 0.129, 0.604, 0.787 )     |
| Specific storage, $S_s$ (1/m) $1 \times 10^{-5}$                               |         | $1.34[1] \times 10^{-7}$    |
| $\lambda$ in Eq. (3)                                                           | 0.004   | -                           |
| Equivalent aperture of fissures belonged to each group                         |         |                             |
| $ta_1$ (for group 1) ( $\mu$ m)                                                | 100     | 64.8                        |
| $ta_2$ (for group 2) ( $\mu$ m)                                                | 100     | 36.9                        |
| $ta_3$ (for group 3) ( $\mu$ m)                                                | 100     | 52.2                        |
| Residual square sum                                                            |         | $8.29 \times 10^{-2}$       |
| Maximum number of iteration                                                    |         | 46                          |
| { }; True value, Injected volume $Q: 8 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{sec.}$ |         |                             |

解析を行った。結果を各々、Table 2(a)～(c) に示す。ケース 1-1 は水頭観測値が 5 点、ケース 1-2 は 10 点、ケース 1-3 は 15 点である。ケース 1-1 については、水頭の観測値と計算値との残差平方和が十分小さく求まっているにもかかわらず、得られた透水テンソル、および比貯留係数は満足いくものではない。ケース 1-2 については、Table 2(b) に示すように、推定された透水テンソルは真値と 30% 程度の誤差範囲で一致している。比貯留係数については真値と 50% 以上の誤差を持っている。ケース 1-3 では、Table 2(c) および Fig. 4 に示すように、透水テンソルについては誤差 12%、比貯留係数については誤差 34% の範囲内で真値に一致しており、さらに推定精度は高い。透水テンソルの主軸方向の推定結果については、Z-主軸の方向は十分一致している。X および Y-主軸の方向は少しずれて求まり、Z-主軸を中心に約 10 度回転した方向に推定された。

## 5. ま と め

亀裂の発達した岩盤ブロックについて、透水パラメータの新たな推定法を提案し、パラメータの決定手順について述べた。さらに、モデル岩盤への適用を通じて手法の妥当性を検討した。ここで得られた知見を整理すると以下になる。

- (1) 岩盤ブロックをそれと等価な水理学的に均質で異方性を持つ多孔質媒体に置換できる場合、岩盤に発達する亀裂をボーリング孔や露頭からサンプリングし、その方位データと二本のボーリング孔に限定したクロスホール透水試験で得られる水頭の経時観測データを用いて、岩盤ブロックの三次元透水係数テンソルと比貯留係数を推定する新たな方法を提案した。
- (2) 三次元場の透水パラメータを直接、逆解析する場合、透水テンソルの 6 成分と比貯留係数の合計 7 個のパラメータについて最適解を探索しなければならない。これに対して、本手法では、一旦、亀裂情報から水理学的、地質統計学的に透水テンソルを求める方法を探るため、探索パラメータ数を 3 または 4 に減少することができた。
- (3) Hsiehらの方法は、複数の観測井を必要とするのに対し、本手法では二本の試験用のボーリング孔と 3 箇所の観測区間から透水係数テンソルと比貯留係数が測定できる。
- (4) 本方法を亀裂性岩盤モデルに適用した結果、サンプリングした亀裂の方位データと二本のボーリング孔を用いたクロスホール透水試験で得られる水頭の経時観測データだけから、対象としている岩盤の 3 つの主透水係数と主軸方向と比貯留係数を精度良く推定できた。

今後、さらに他の岩盤モデルに適用して、本方法の妥当性を検討したい。

## 参 考 文 献

- 1) 西垣 誠・中屋眞司・河野伊一郎(1991) : 原位置における亀裂性岩盤の 3 次元異方透水係数の測定法に関する一提案、土質工学会論文報告集、Vol.31, No.3, pp.185-199.
- 2) Oda, M. (1985) : Permeability tensor of discontinuous rock masses, *Geotechnique*, 35, No.4, pp.483-495
- 3) Hsieh, P. A. and S. P. Neuman (1985) : Field determination of the three-dimensional hydraulic conductivity tensor of anisotropic media, 1 Theory, *Water Resources Research*, Vol. 21, No. 11, pp.1655-1665
- 4) 中川 徹・小柳義夫(1982) : 最小二乗法による実験データ解析、東京大学出版会、pp.99-124.
- 5) 中屋眞司・田中 豊(1986) : 地下水流の解析と逆問題、数理科学、No.274, pp.72-79.
- 6) Akai K., Ohnishi Y., Nishigaki M. (1979) : Finite element analysis of three-dimensional flows in saturated-unsaturated soils, *Proc. 3rd International conf. on numerical methods in geomechanics*, Aachen, pp.227-239.