

(103) 節理性岩盤における 3 次元浸透流解析システムの提案

京都大学工学部 正 会 員 水戸 義忠
〃 正 会 員 菊地 宏吉
早稲田大学大学院 学生会員 ○山本 佳正
京 都 大 学 吉川 浩二

System of 3-D seepage flow analysis for jointed rock masses.

by

Yoshitada MITO and Kokichi KIKUCHI

(Faculty of Engineering, Kyoto Univ.)

Yoshimasa YAMAMOTO

(Graduate School of Sci. & Eng., Waseda Univ.)

Koji KIKKAWA

(Kyoto University)

ABSTRACT

The authors had carried out 3 serieses of in-situ seepage flow test in order to know characteristics of actual flow through joints as mentioned at this symposium, 1989¹⁾ and 1990²⁾. Based on the results, we had developed a system of 3-D seepage flow analysis method for jointed rock masses. In this paper, we report these results of our calculation (30 models has been done) as well as to carry out 3-D seepage flow analyses, and considered on these results in this system.

1. はじめに

節理性岩盤における浸透流は、節理系を主たる浸透経路としており、よってその節理分布が浸透流挙動を支配している。著者らは、その節理系の透水性の評価手法を開発すべく原位置試験を3シリーズにわたっておこない、水理モデルの基礎となる貴重な知見を得ながら2次元浸透流解析手法を開発するまでに至った³⁾。

しかしながら、節理はさまざまな方向で3次元空間に分布しており、2次元領域で取り扱うには限界がある。また、原位置試験の流路調査によっても浸透流路は複雑な3次元ネットワークを形成していることが分かっており、岩盤の3次元的な異方性・不連続性を考慮した解析手法の開発が必然的に必要となってくる。

そこで本研究では、原位置試験によって検証された解析モデルを用いて3次元浸透流解析システムを構築し、このシステムを用いて解析をおこなった結果、得られた解析解は原位置試験結果と良く一致していた。原位置試験によって3次元解析手法の妥当性を確認できたことにより、節理調査から解析までの一連の浸透流解析システムとして、ここに提案するものである。

2. 3次元浸透流解析システム

原位置試験の対象を、一節理群(SERIES-1)、単一節理(SERIES-2)、節理系(SERIES-3)とにわけて3シリーズにわたり試験をおこなった結果、節理性岩盤における浸透特性および解析モデルに必要な水理定数に関する知見が得られた。その中でも次に挙げるものが解析モデル構築上重要な項目となった。

- (1) 浸透流は節理系を主たる浸透経路とする。
 - (2) 浸透流は単一節理面上において一様な平面流れではなく、複雑なチャンネリングを形成し節理の連結によってその流路構造は3次元的に広がっている。
 - (3) 節理性岩盤における浸透流に対してダルシー則が成立する。
 - (4) 浸透流は、水理モデルとして平行平板モデルまたは複数パイプモデルでよく説明できる。
- これらの知見を基に、本解析システム構築にあたっての条件として以下の仮定を設定した。

- ① 流れは節理のみに生じるものとする
- ② 節理内の流れはダルシー則に従うものとする

③ 節理の透水係数は、節理の幾何学的寸法によって決まる。

本研究では解析システムの開発に際して、極力原位置試験での結果を反映することによって現実に即した浸透流解析手法を目指し、岩盤露頭面における節理調査から岩盤透水性評価に至る3次元解析システムを構築した。

2. 1 解析システムの概要

3次元解析システムについて、図1にその概要図を示す。以下解析手順について述べる。

1) 節理調査

岩盤中の節理分布は一般に規則性を有するが、その正しい認識が実岩盤により近似したモデル作成の際に非常に重要である。岩盤内の節理調査は、節理分布が広範囲にわたり多数存在することおよび、調査可能な領域が限られていることを考慮すると基本的に標本調査の形をとらざるを得ない。この標本調査においては、標本抽出の際の偏りのために標本集団が真の母集団と一般に異なる可能性があるという点を考慮することが重要であり、このような標本集団の偏向を定式化し、補正を一般化して不偏性のある値を導くことができるような調査手法を用いることが必要である。このような調査手法としては、従来より調査線もしくは調査平面を岩盤表面に設定する方法が用いられており、広く一般に知られている。

2) 3次元節理分布モデル作成

本システムでは不連続体解析モデルを採用しており、節理性岩盤のモデルの精度に解の信頼性が大きく依存する。しかしながら限られた2次元の露頭範囲における節理調査だけでは、決定論的な3次元モデルを作成するのは不可能である。そこで確率的な手法によってモデル化を行うことが有効となってくる。このようなことから、本システムの3次元節理分布モデルには確率モデルを用いており、モデル化に必要な各パラメータ（節理の方向性、半径、3次元密度、開口幅、挟在物の有無、粗さ等）に対して確率空間を推計し、疑似節理系を発生させている。

また、実際の節理は多角形であると考えられるが、今後このモデルにおいては節理を解析的に取り扱うのに有利な円として表現している。

3) 節理の3次元連結性の把握

節理は岩盤内に多数存在しており、それぞれの節理は互いに複雑に連結しあっている。知見(1)(2)より、浸透流の主たる浸透経路は節理であり、これらの連結部を経由して流れが生じている。このような流れを3次元的に捉えるためには、節理の3次元的な連結性を把握する必要がある。節理モデル内の節理の連結部を、円（節理）の交線として幾何学的に認識し、全節理を対象に連結部の交線の位置を算出する。

4) 解析条件の設定

本システムの対象とする3次元解析領域は便宜的に直方体であり、図2に示すようなボーリング孔や壁面からの浸透流挙動を数値シミュレートできる。今回、システムの適用を試みたSERIES-3の原位置試験における境界条件は図2のCG型となっており、次式で示す水頭既知のDirichlet条件を用いている。

$$h(x) = h_n(X) \quad (x = X \text{ 上の境界条件}) \quad \cdots \cdots (1)$$

なお h_n は、ピエゾ水頭をあらわす。

5) 流路の認識

3次元節理分布モデル内に存在する節理の連結性に関する情報から、浸透流は連結した割れ目系を通してのみ生じるものとして解析領域内の流路を認識する。

本システムでは、解析モデルを割れ目系ネットワークモデルとしており、流路は一次元要素として表現している。流路の認識とはこの1次元流路要素ネットワークモデルの作成に等しく、その流路要素は次の条件

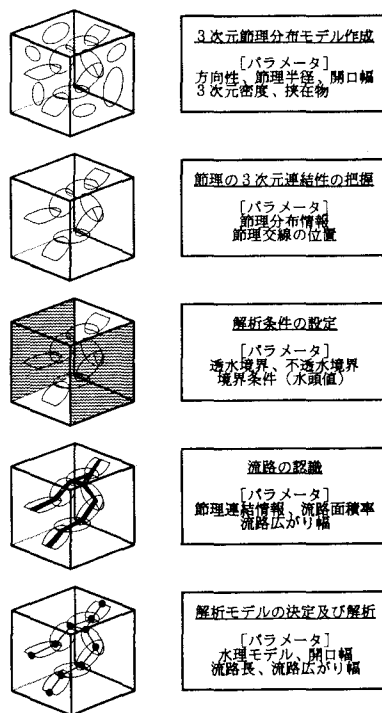


図1 3次元解析手法の概念図

を満たすものとする。

- ①一つの流路要素は単一節理面内のみ存在し得るものとし、複数の節理面にまたがって存在することはない。
- ②節点は、原則として節理の交線の midpoint 全てに設定する。ただし流れを生じない節理面へ連結する交線上には節点を設定しない。
- ③流路要素は原則として、各節理面内において標高の高い節点から順に直線で結び、それぞれを流路要素とする。
- ④各流路要素の広がり面積は、その節理内の流路面積を要素の長さに比例して割り当てる。
- ⑤流路の広がり幅は各節理面上の流路要素の全長で一定とする。

以上の流路要素の割当条件の中には、流路認識におけるパラメータとして流路面積が含まれている。各節理面における流路面積を決定する際には、有効間隙面積率 s_R （節理面積に占める流路面積の割合）が重要なパラメータとなり、確率モデルを用いて解析するには、この有効間隙面積率 s_R の確率構造も定義する必要がある。節理内の流路面積はさまざまな条件にもよるが、節理そのものの特性要素と関係があるものと考えて、節理の方向、半径及び開口幅分布と有効間隙面積率との相関性について検討した結果を図3～図5に示す。標本数26から考えればいずれも相関が弱く、統計的な評価を行うには危険である。そこで、有効間隙面積率 s_R の確率構造を独立関数

としてとして捉え、図6は、有効間隙面積率の頻度分布を示したものであるが、この分布から正規分布を仮定する。したがって、確率関数は次式で表される。

$$f(s_R) = N(\tilde{s}_R, \sigma) \quad \dots\dots (2)$$

ここで、 $\tilde{s}_R$ ：平均有効間隙面積率（%）、 σ ：標準偏差である。

6) 解析モデルの決定

および解析

上記のようにして設定した節理モデルおよび流路構造を解析対象として、ここでは各節理の幾何学的寸法によって流路要素の透水係数を決定し、解析用の1次元要素の3次元ネットワークモデルを作成する。また解析モデルは、線要素を用いた1次元有限要素法モデルである。知見(3)を考慮して、ここでは次式に基づ

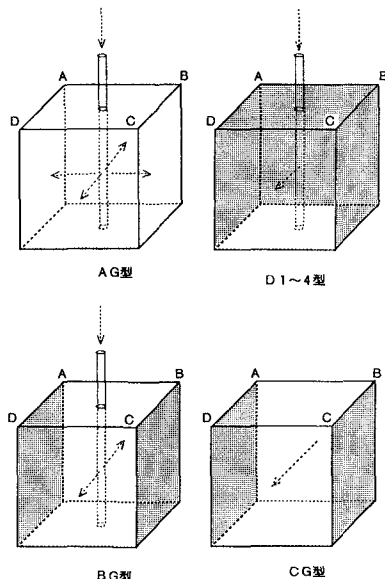


図2 解析条件のパターン

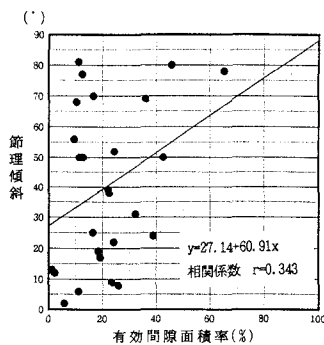


図3 傾斜と有効間隙面積率の関係

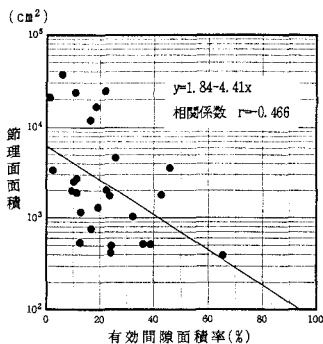


図4 面積と有効間隙面積率の関係

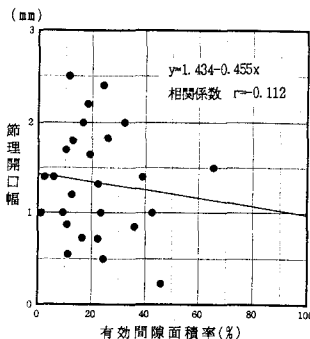


図5 開口幅と有効間隙面積率の関係

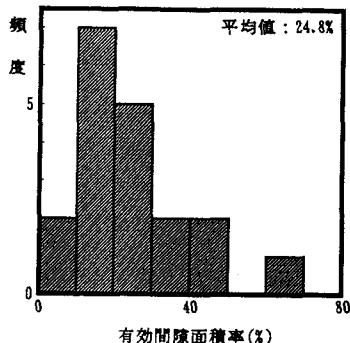


図6 有効間隙面積率の頻度分布

くDirichlet問題のFEM解析を行う。

$$[K]\{h\} + \{Q\} = 0 \quad \dots\dots (3)$$

ただし、 $[K]$ ：全体剛性マトリックスである。また、各要素における透水係数 K_j は、知見(4)と流速の概算において平行平板モデルより比較的良い値を示した複数パイプモデル（図7）を仮定し次式で表されるものとする。

$$K_j = \frac{g t_j^2}{32\nu} \quad \dots\dots (4)$$

ここで、 t_j ：流路要素 j の開口幅、 g ：重力加速度、 ν ：動粘性係数である。また原位置試験への適用の際、境界条件は式(1)に表したとおり水頭既知のDirichlet条件を用いている。

2.2 解析システムの原位置試験への適用

この一連の解析をSERIES-3の実験に対して適用し、以下の項目について検討を試みた。

- a) 解析領域を流れる全流量 Q を求め、実測値と比較検討する。
- b) 解析結果を流速分布として表し、実測値との比較を行う。

1) 解析ケース

解析モデルの設定にあたってまず、節理分布に関する推計結果を反映させて3次元節理分布モデルを作成する。大きさは実際の大きさを反映しており、横1.3×縦2.2×高1.5mである。前述のように、解析モデルとして確率モデルを用いており、その信頼性を高めるためには試行回数を増やして、そのばらつきを評価する必要がある。そこで今回は1ケースにとどまらず、節理分布モデルを30ケース作成して解析を行い、そのばらつきを検討して結果に評価を加えている

2) 解析結果とその評価

a) 解析領域を流れる全流量 Q について

図7に示した複数パイプモデルでは、要素内を流れる流量 Q_i はその要素の間隙幅 t_i と鉛管の個数 w_i （を広がり幅として） $N = \frac{w_i}{t_i}$ により次式のように定義される。

$$\begin{aligned} Q_i &= \frac{g t_i^2}{32\nu} \cdot N \pi \left(\frac{t_i}{2} \right)^2 i \\ &= \frac{\pi g w_i t_i^3}{128\nu} i \quad \dots\dots (5) \end{aligned}$$

ここで、 i は要素方向の動水勾配である。ここで Q_i の単位次元は $[L^2 T^{-1}]$ となり、実流量として与えられる。したがって解析領域内を透水境界を横切って流れる総流量 Q は、透水境界に節点を持つ要素の流量 Q_i の総和として表される。

$$Q = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{N_b} |Q_j| \quad \dots\dots (6)$$

ここで、 N_b は透水境界に節点を持つ要素の数である。これら線要素の3次元ネットワークを有限要素法解析することによって、解析領域内の未知ポテンシャルが求められ、上式(6)により流量 Q が求められる。この流量を用いて、解析領域全体における動水勾配方向の透水係数 K_s が次式によって算出できる。

$$K_s = \frac{Q}{A(H-H')/L} \quad \dots\dots (7)$$

ここで、 A, L はそれぞれ解析領域の断面積、浸透流路長であり、 H, H' はそれぞれ透水境界における水頭値である。なお、境界条件と

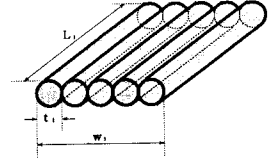


図7 複数パイプモデルの概念図

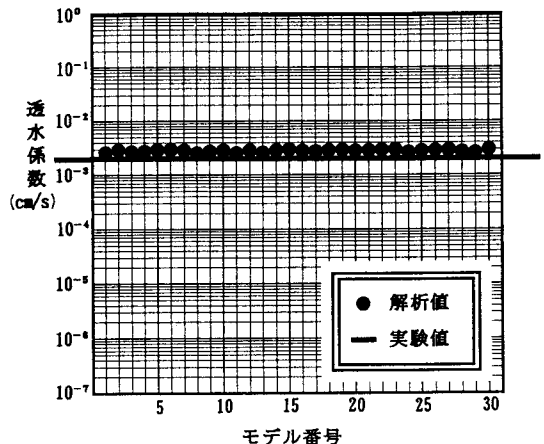


図8 実験値と解析結果の比較

しては、図2のCG型とし、水頭差100cm（動水勾配=0.312）を設定した解析を実施した。その結果を図8に示す。この解析結果は、解析領域全体としての平均透水係数が 2.82×10^{-3} cm/secとなり、実測値 2.22×10^{-3} cm/secと著しく一致した。なお、3次元チャネリングネットワークモデルは確率統計モデルであるため、このモデル的的確性及び各モデルのばらつきを検討するために30ケースについて浸透流解析を行ったが、計算結果はいずれのモデルにおいても $2.54 \times 10^{-3} \sim 3.04 \times 10^{-3}$ cm/secの範囲をとり、実測値と良い一致性が認められた。

b) 解析領域内の流速分布について

放射性廃棄物の地層処分などを考えた場合、地下水の浸透速度（流速）は非常に重要な値である。ここでは、流速について検討することを目的として、3次元解析結果を流速分布として表して検討する。そこで流速分布として各解析要素の要素流速 v_j を次式により求め、その分布について検討する。

$$v_j = \frac{g t_j^2}{32\nu} i_j \quad \dots\dots (8)$$

ここで、 i_j は線要素j内の動水勾配である。図9は全モデルについて上式により算出した要素流速の分布を示したものである。要素流速は $10^{-4} \sim 10^1$ cm/secの範囲にわたっており、平均要素流速は2.20 cm/secと算出された。これは概算ではあるが実験により得られた節理内の実測流速0.64～4.67 cm/secにほぼ対応した値となっている。割れ目内の流速は、割れ目の透水係数とその動水勾配のみにより決定される。すなわちここで流速分布が妥当な値であったということは、今回の解析結果において岩盤内の水頭分布に関しては、ほぼ実現象に対応しているものと考えられる。

3. おわりに

- (1) 本研究では、これまで3シリーズにわたる浸透流原位置試験によって、節理性岩盤における浸透特性を把握し、種々の仮定を設けて3次元浸透流解析システムを開発した。
- (2) 本システムは節理系の幾何学的モデルを用いて解析を行っている。その幾何学的情報だけからの解析にも関わらず、節理系の解析領域全体としての平均透水係数が 2.82×10^{-3} cm/secとなり、実測値 2.22×10^{-3} cm/secと著しく一致した。
- (3) 解析領域内の要素流速分布を求めた結果、平均は2.20 cm/secとなり、原位置試験での実測値2.69 cm/secによく対応している。この要素流速は動水勾配のみによって計算されており、したがって解析領域内の水頭分布に関して現実とよく一致した評価がされていると考えられる。
- (4) 本研究においては、節理性岩盤の浸透流を把握するための解析手法について述べた。岩盤浸透流の問題についてはまだまだ解析しなければならない課題が多数あるが、この課題を解決するためには、現実の浸透流の挙動を見据えながら検討をおこなっていくことが重要であると考ええる。

参考文献

- 1) 菊地宏吉・三室俊昭・小林隆志・水戸義忠：実岩盤の節理内流れに関する実験と考察、第21回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、1989
- 2) 水戸義忠・菊地宏吉・鶴田修・本多眞：実岩盤の節理内流れに関する実験と考察（その2）、第22回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、1990
- 3) 菊地宏吉・水戸義忠・三室俊昭・本多眞・山本佳正：節理性岩盤の浸透流解析に関する実験的研究、第23回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、1991

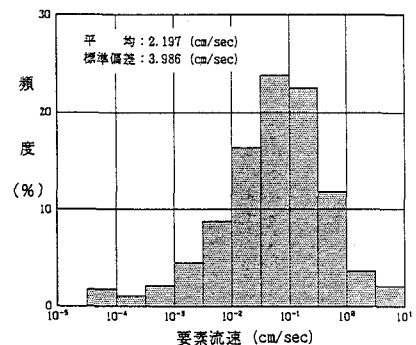


図9 要素流速の頻度分布