

(49) 節理性岩盤の浸透流解析に関する実験的研究

京都大学工学部 菊地宏吉

〃 水戸義忠

東電設計(株) 三室俊昭

早稲田大学 本多 眞

〃 山本佳正

In situ experimental studies on groundwater flow analysis for jointed rock masses.

by

Kokichi KIKUCHI and Yoshitada MITO

(Faculty of Engineering, Kyoto Univ.)

Toshiaki MIMURO

(Tokyo Electric Power Services Co.Ltd.)

Makoto HONDA and Yoshimasa YAMAMOTO

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

ABSTRACT

The authors have carried out 3 serieses of in-situ seepage flow test in order to know characteristics of actual flow through joints, and analyzed the results. Based on the results, some important knowledge which will become a foundation of analytical model could be obtained. In this paper, we report these results of our experiments as well as to carry out 2-D seepage flow analyses using 3-D geometrical model of joint system for developing 3-D analysis method, and considered on these results.

1. はじめに

現在まで岩盤浸透流の解析モデルとして多孔質モデル、割れ目系モデル等のいくつかのモデルが研究されているが、これらの水理モデルの基礎となる実岩盤中の地下水流れの構造や性質は十分把握されておらず、モデルの妥当性の評価が困難となっている。

硬質塊状岩盤の浸透流は節理系を主たる浸透経路とする流れと考えられているが、これまでに筆者らは、解析手法の開発のために岩盤中の地下水流れを把握することを目的として現場実験を行い、水理モデルの基礎となるいくつかの貴重な知見を得てきた。本研究では、新たに行った現場実験の結果を報告するとともにこれまでの知見を基に拡張2次元浸透流解析手法を検討し、この解析手法を用いて現場実験のシミュレーションを行った。また、3次元解析手法について予察を行った。

2. 原位置浸透流実験

著者らはこれまで原位置の岩盤を用いた浸透流実験を3シリーズにわたり行った。SERIES-1、-2の実験結果に関しては既に報告したとおりである。SERIES-1、-2の実験はいずれも単一節理に着目して、透水性の検討、ダルシー則の検討および流路の検討を行ったものであるが、節理性岩盤における浸透流の経路はさらに節理の組合わせにより複雑なものとなっていることは明かであり、節理系に対する検討が必要である。そこで第3回目では解析システムの構築に不可欠な岩盤全体の浸透特性を捉えることを目的として、供試体ブロック(3m×2m×2m)の作成後1壁面に水室を設け、図1に示すような節理系を対象とした実験を行った。

1) 流速測定試験

流速測定試験では、水頭値を岩盤表面として水室に水を速やかに注入、満水させ、壁面(C-D面)節理への浸出時間を測定することにより節理内の流速を推察する。ただし水室(A-B面)から供試体前面(C-D面)への一面流れを目的とするため、2側面は不透水境界としている。

その結果、壁面下部の節理から順に上部の節理へと流出箇所が移っていくことが認められ、満水までの時

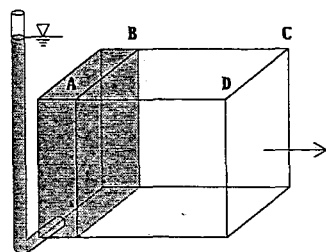


図1 透水試験の概念図

間を考慮しても、下部の節理は上部の節理よりも水室との浸透経路が短いと考えられる。そこで最短流出時間および流路の長さ（供試体の大きさ約 300cm）から流速を推定すると、流速は約 2.3cm/sec となった。この値は前回の結果に対応しており、実験サイトが近接していることを考慮すれば妥当な結果といえる。ただしこの計算では水頭の増加あるいは水頭差を考慮していないため、流速の値に関しては厳密なものではなく、あくまで概算である。

2) 定水位透水試験

対象岩盤の透水性の把握を目的として、水頭を4段階変化させて定水位透水試験を実施した。実験の結果、流出量と水頭の関係より水頭に比例して流出量が増加しており、わずかなではあるが昇圧段階に比べて降圧段階で流量が多くなっているのが認められた（図2）。また各段階における透水係数には大きな差は認められず、ダルシー則はほぼ成り立っているものと考えられる。本試験での平均透水係数は $K_A = 2.22 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ と算出された（図3）。尚、ここでの透水係数の算出にあたっては、ほぼ供試体の壁面全体から流出していることから水頭は岩盤表面以上にあると考えて、次式を用いて行っている。

$$K_A = \frac{Q}{L \cdot H \cdot i} \cdot \frac{1}{60} \quad (\text{cm/sec}) \quad \dots (1)$$

ここで、 Q : 流出量 (cc/min)、 L : 供試体平均幅 (220cm)、 H : 供試体の平均高さ (200cm)、 i : 動水勾配である。

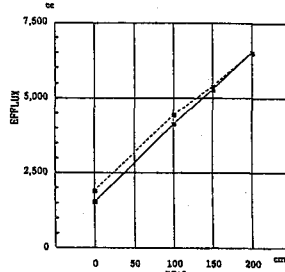


図2 定水位透水試験
(水頭と流量の関係)

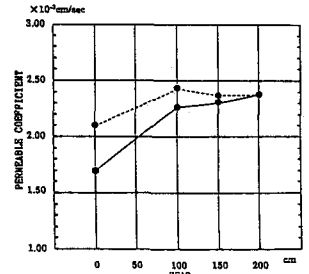


図3 定水位透水試験
(水頭と透水係数の関係)

3. 2次元浸透流解析システムの適用

3シリーズにわたる原位置試験により、単一節理内の局所的な流れから、多くの節理が組合わさった比較的大きな範囲の流れまで、節理性岩盤における浸透特性および水理定数に関するいくつかの知見が得られた。そこで、これらの実験結果に基づく2次元ネットワーク解析モデルを提案し、SERIES-3の実験に対して適用を試みた。今回のように節理系を主たる浸透経路とする局所的な流れの解析には、割れ目系モデルを用いた解析が有効である。そこで著者らが従来より提案してきた確率3次元割れ目系モデルを用い、系統的に切り出した断面における2次元ネットワーク解析を行う。

浸透流解析において特に重要となるのが水理モデルの設定とその入力物性値としての水理定数であるが、原位置試験の結果より、節理性岩盤における浸透流についてもダルシー則が成り立つものとして、基本的な水理モデルは次式で表されるものとする。

$$Q = k A i \quad \dots (2)$$

ここで Q は断面積 A を単位時間あたりに流れる浸透流量、 i は動水勾配、 k は透水係数である。

3.1 解析システムの概要

図4は今回提案する解析システムのフロー図である。以下に解析手順について述べる。

1) 3次元節理分布モデル作成

節理分布を確率統計学的に取扱ったモデル化を行うために必要なパラメータは、節理の方向性、半径、3次元密度、開口幅、挟在物であり、原位置での節理調査結果を基に推計を行い3次元節理分布モデルを作成する。

2) 2次元断面の切り出し

作成された3次元モデルから一定間隔 (d) で系統的に2次元断面を切り出し、2次元モデルでは得られない3次元的な節理の連結性のある程度評価した拡張2次元ネットワークモデルを用いた解析を行う。またそれぞれの2次元断面の解析で得られる流量 Q_i は面積流量で与えられるため、全体としての流量 Q の評価は次式で与えるものとする。

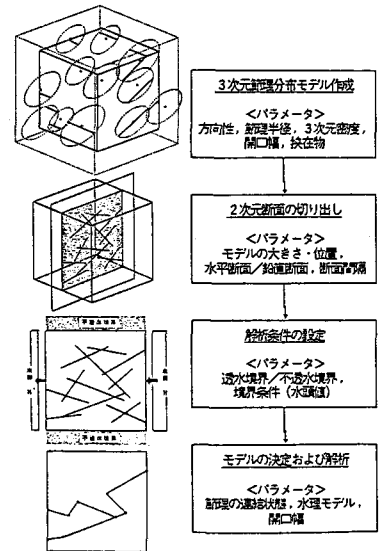


図4 2次元解析システムの概要図

$$Q = d \tilde{\gamma} \sum_{i=1}^{N_i} Q_i \quad \dots (3)$$

ここで、 $\tilde{\gamma}$: 透水性評価に関するパラメータ、 N_i : 断面の数である。

なお切り出しに際しては、断面の大きさ、方向、位置及び間隔等を決定する必要がある。

3) 解析モデルおよび条件の設定

切り出した断面において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、境界条件を明確にした断面浸透流解析モデルを作成する。解析モデルは線要素を用いた1次元FEMモデルである。ここでは次式に基づくDirichlet問題のFEMを行う。

$$[K]\{h\} + \{Q\} = 0 \quad \dots (4)$$

ただし、 $[K]$: 全体剛性マトリックスである。

尚、各割れ目の透水係数 K_i は平行平板流れを仮定して次式で表されるものとする。

$$K_i = \frac{g t_i^3}{12 \nu} \quad \dots (5)$$

ここで、 t_i : 割れ目要素 j の開口幅、 g : 重力加速度、 ν : 動粘性係数である。

3. 2 原位置試験への適用

この一連の解析を前述した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。

- 1) 各断面 i における断面透水係数 K_{si} を求め、断面の位置や間隔によるばらつき及び実測値との比較を行う。
- 2) 各断面を流れる流量から、全体流量 Q を求め、透水性評価に関するパラメータ λ_i について検討する。
- 3) 流れの流速について検討することを目的として、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) 解析モデルの設定

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。図5は節理分布をモデル化した供試体の様子を示したものである。大きさは実際の大きさを反映しており、横2.3×縦3.2×高2.0mである。尚、この領域内に含まれる節理数は237である。

解析断面を切り出すにあたっては、便宜上水平および鉛直断面のみに絞り、間隔は約10cmとしている。解析条件としては、実際の透水試験に準じて水平断面ではBC、DA辺を不透水、AB、CD辺にそれぞれ水頭値を与えて透水境界としている。また鉛直断面はBC、DA面に平行に切り、上辺及び底辺を不透水、両側辺に水頭値を与えて透水境界としている。

2) 解析ケース

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

3. 3 解析結果とその評価および検討

1) 各2次元断面解析と断面透水係数 K_{si} について

2次元断面 i の流れの方向(BC方向)の透水係数 K_{si} は次式で与えられる。

$$K_{si} = \frac{Q_i}{L_{(AB)}(H - H') / L_{(BC)}} \quad \dots (6)$$

ここで、 Q_i : 断面 i におけるBC方向の単位時間あたりの面積流量(cm^2/sec)、 $L_{(AB)}$: 透水境界辺の長さ(cm)で、

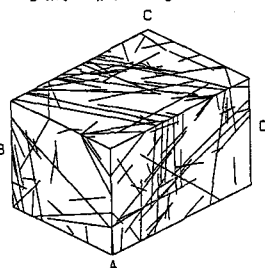


図5 3次元節理分布モデル

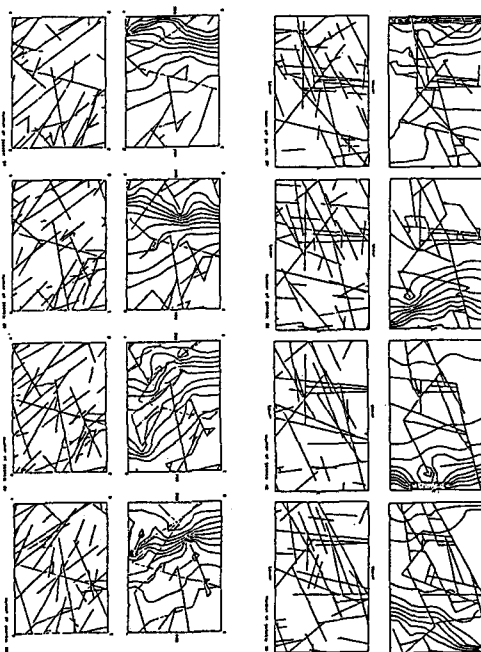


図6 解析結果の一例

ここでは水平断面のときAB辺の長さ(230cm)、鉛直断面のとき供試体の高さ(200cm)、 H, H' :それぞれ透水境界における水頭値である。なおここでは定常解析を目的としており、水頭は水頭差が0でない任意の値をとることができる。ここでは水頭差を100cmとして設定している。

図6は解析結果の一例である。ここに示したものは水平断面(左)、鉛直断面(右)の一部であり、それぞれ左の図が節理分布図、右の図が解析結果の水頭分布図である。水頭分布図をみると等ポテンシャル線は、流れの方向に対してかなりばらつきがみられ、断面の位置および方向によっても大きく異なっていることがわかる。また各断面を切る節理の数は約50~60であるが、流れを生じている節理数は40~50となり、約20%程度減少している。

表1は動水勾配が1の場合における解析から得られた各モデルの平均計算流量及び実測流量を示したものである。これによると平均の計算流量は単純平均で $2.1084 \times 10^1 \text{ cm}^3/\text{sec}$ であり、実測流量の $1.021 \times 10^2 \text{ cm}^3/\text{sec}$ に対して約20%程度の値となっている。また、水平断面の計算流量は鉛直断面の計算流量の約1.5倍程度大きいことがうかがえる。解析結果のばらつきを見ると鉛直断面の方が約2倍程大きく、水平断面に比べて各解析断面において値のばらつきが大きいことを示している。これは本サイトの節理の傾斜が 90° に近いものが多く、そのため鉛直断面では節理トレースの連結性が低く、流れを生じない断面が多いことに起因していると考ええる。

図7は全ての断面透水係数 K_{si} の頻度分布を示したものである。これによれば、約半分の解析断面において流れを生じていないことがわかる。これは3次元空間内に複雑に連結している節理を次元の低い2次元断面で評価していることに起因していると考えられる。

2) 全体流量Qとパラメータλについて

浸透流解析の結果として有用となるのが、解析領域内を流れる地下水の流量とその流速である。特に流量は、不飽和-非定常問題への拡張を考えると適切な評価が必要となる。したがってより適切な解析結果の評価のためには、透水性評価のパラメータ $\tilde{\lambda}$ を何らかの指標に基づき決定する必要がある。ここでは実測透水係数 K_A を用いて $\tilde{\lambda}$ を評価する。式(3)より次のように定義される。

$$K_A = \tilde{\lambda} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_{si} \quad \dots (7)$$

そこで実測透水係数に $2.22 \times 10^{-3} \text{ (cm/sec)}$ を与えて平均 $\tilde{\lambda}$ を算出した。表2は、表2 透水性評価のパラメータの結果を示したものであるが、これによると水平断面に比して鉛直断面での値が大きいことがうかがえる。これは一つは、本モデルの節理分布が鉛直割れ目を主体としており、鉛直断面の節理トレースが動水勾配ベクトルに対して直交するものが多いことがあげられる。もう一つは水平、鉛直断面において節理トレースの交点の数を比べるとわかるとおり、鉛直断面での節理トレースの連結性が水平断面に比して低いことが起因していると考ええる。

3) 要素流速 v_j について

流れの流速について検討するため、各解析断面において各々の線要素の要素流速 v_j を次式により求め、その分布について検討する。

$$v_j = K_j \cdot i_j \quad \dots (8)$$

ここで、 i_j は線要素j内の動水勾配、 K_j はj要素の透水係数で式(5)により求められるものである。

図8に要素流速の分布を示す。要素流速は $10^{-4} \sim 10^1 \text{ cm/sec}$ の範囲にわたっており、平均要素流速としては 0.18 cm/sec である。これは概算ではあるが実験により得られた節理内の実流速 $0.64 \sim 4.67 \text{ cm/sec}$ に比して1オーダー小さい値となっている。しかしながらここでの実測値は平均流速ではなく節理内の主流路における値であるため、全流れ要素を考える場合にはさらに小さく見積もられると予想され、解析結果は一応妥当な値と考える。

表1 平均計算流量及び実測流量

	水平断面(cm^3/sec)	鉛直断面(cm^3/sec)	全体(cm^3/sec)	実測値(cm^3/sec)
平均流量	2.4138×10^1	1.8032×10^1	2.1084×10^1	1.021×10^2

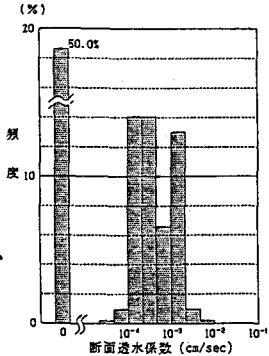


図7 断面透水係数の頻度分布

	平均 $\tilde{\lambda}$
水平	6.914
鉛直	9.168
平均	7.883

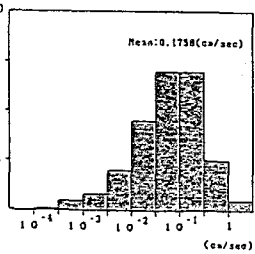


図8 要素流速頻度分布

4. 3次元浸透流解析システムへの予察

割れ目はさまざまな方向で3次元空間に分布しており、2次元領域での取り扱いには限界がある。この意味で割れ目系モデルを用いた3次元解析手法の開発が不可欠であり、ここではその予察として、基本的な3次元ネットワークモデルを用いた3次元解析手法について提案する。

図9はここで提案する解析システムの概念図である。以下にそれぞれの解析手順について述べる。

1) 3次元節理分布モデル

2次元解析と同様、解析モデルの基本となる3次元節理分布モデルを前述した手法で作成する。

2) 節理の空間的連結性の把握

節理は限られた空間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合っている。節理性岩盤における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。したがって、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。

3) 流路の認識

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領域内の流れの流路を認識する。

浸透流解析を目的とした場合、浸透特性に直接影響を及ぼす流路の特性パラメータとして、各々の単一節理内においてその面積に占める流路の面積の割合（有効間隙面積率 s_R ）があげられる。この有効間隙面積率に関しては、SERIES-1の原位置における流路調査からいくつかのデータが得られており、その確率空間が次式で表されるものと仮定する。

$$f(s_R) = \int_{\tau} f(t) \int_{\kappa} f(r) \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} f(\omega, \varepsilon) \cdot f(s_R | \omega, \varepsilon, r, t) d\omega d\varepsilon dr dt \quad \dots (9)$$

ここで、 $f(\omega, \varepsilon)$ 、 $f(r)$ 、 $f(t)$ はそれぞれ節理方向、節理半径、開口幅の確率関数である。

4) 水理モデルおよび解析条件

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、線要素のネットワークモデルを作成して、2次元解析と同様、式(4)に基づくDirichlet問題のFEM解析を行う。

5. おわりに

1) 本システムは節理性岩盤における浸透流を、ダルシーの法則に従うものとして、2次元割れ目系ネットワーク解析を行うものであり、特に3次元的要素を組み込むために、解析断面は3次元節理分布モデルから系統的に切り出している。

2) 本システムをSERIES-3の実験に適用した結果、動水勾配1のときの平均計算流量は $2.11 \times 10^4 \text{ cm}^3/\text{sec}$ で、実測値の約20%という値が得られた。また各断面解析結果の標準偏差には大きなばらつきはみられなかった。この結果を見る限り誤差は1オーダー以内であり、一般にルジオン試験等により得られる透水係数のばらつきが1オーダー以上であるのに対して、本結果は非常によく現実と対応しているものと考えられる。

しかしながら、水平断面と鉛直断面とでは平均透水係数に約1.5倍程度の違いを生じており、これは節理の異方性によるものと考えられ、今後は方向の異なる断面における解析結果のリンクに課題があるものと考えられる。

3) 解析から要素流速を求めた結果、平均が 0.18 cm/sec であった。この値は実測値より小さく見積もられているが、これは流れの大きな主流路で求めた実測値に対して、本結果が流れの小さな流路も含めた全流路で求めた値であることが起因していると考えられ、本結果は一応妥当なものと考えられる。

4) 3次元解析の予察として、決定的手法によるシステムの基本的な概念について提案した。今後はこのシステムをさまざまな岩盤に適用・評価することでその問題点や課題を摘出し、より有用なものとしてゆく所存である。

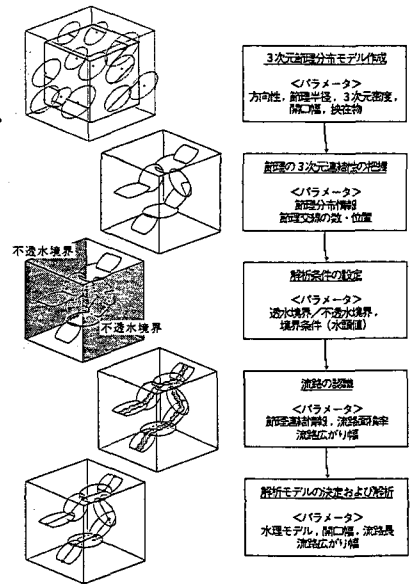


図9 3次元解析システムの概念図