(71) 岩盤ジョイント内の自由水面を有する浸透流解析

岡山大学工学部 ○ 西垣　誠
京都大学工学部　大西有三
佐伯建設工業㈱　河辺知久

1．はじめに

岩盤内の浸透は，土中の浸透のように，透水係数を用いて，平均的な透水性を対象とした研究と，岩盤の割れ目が卓越している時に，この割れ目内の流れを対象とした研究とに分類できる。前者の研究に関しては，土質力学の浸透分野で研究された方法が，そのまま岩盤内の浸透に応用でき，その解析手法は飽和－不飽和領域を対象とした3次元問題にまで拡張され，きわめて有効な手法となっている。しかし，原位置でどのように岩盤の浸透特性を計測するかの問題がある。

一方，後者に関しては，ボーリング試験より，割れ目幅や割れ目方向，さらに割れ目密度などの分布が計測され，それらのデーターを基礎として，割れ目ネットワークを作成して，その浸透解析を数値解析によって行おうとするものである。この種の方法はLongによって用いられ，[1] 我国でも応用されている。[2,4] しかし，従来は被圧帯水層に関する研究が主であり，[3] 自由水面を有する不圧帯水層に対しての割れ目内の流れはきわめて少ない。著者らは，自由水面を有する割れ目内の浸透実験と不飽和領域を考慮した割れ目内の浸透解析の比較を行い良い一致を得たが，[5] 実際に不飽和の特性を計測することはきわめて困難である。本報告では，この解析手法をさらに改良して，不飽和の浸透特性を用いないで，自由水面を有する岩盤割れ目内の浸透解析方法について論述する。

2．割れ目モデルの作成方法

対象としている解析領域に対してのボーリング調査より，割れ目の方向性，密度，長さ，開口幅などの分布を把握して，このデーターを基に統計的に決定された分布に従って所定の出現頻度となるまで図－1のように発生させる。　ここで発生した割れ目ネットワークの中で死水域となり水の流れに関係しない割れ目を以下の方法で消去する。

(1)割れ目の交点に番号をつけ，節点として，交点間を要素として番号をつける。

(2)各節点で要素によって連結される節点番号を求める。

(3)各節点で連結される節点が一つしかない節点と要素を消去する。なお境界線上の節点は保留する。（図－1の（b）参照）

(4)(3)の操作を繰り返した後，流入境界から流出境界へ向うパスを見つけ，そのパス上の要素以外の要素を消去する。（図－1の（c）参照）

このように，流れに関係する割れ目だけにすると，計算機の記憶容量や演算時間をきわめて少ないものにすることが可能である。削除した節点や要素があるため，節点番号および要素番号の付け換えを行い記憶容量を減らしていく。この処理により，視覚的にも流れの方向が明確になり，異方性に関しても比較的予測がつきやすくなる。

割れ目の交点間を要素とし，交点を節点とする有限要素法による数値解析は，文献2）と同じ方法である。

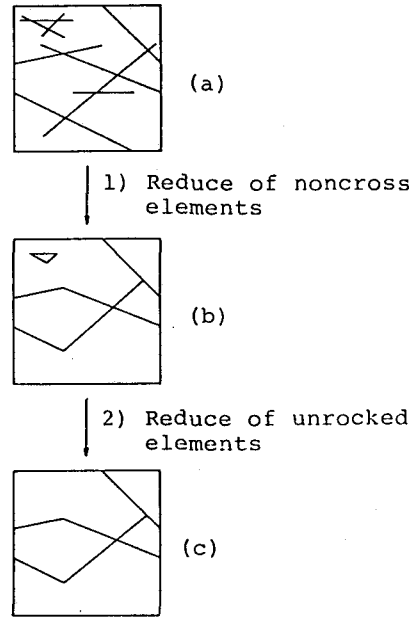

Fig.1　Reduce of fractures network

3．自由水面の取り扱い

自由水面を有する割れ目内の浸透では，自由水面上では圧力水頭が零であるとし，自由水面より上部では，不飽和領域であるが浸透は生じないものと考えた。すなわち，飽和領域内でのみ浸透が生じると仮定する方法で割れ目系内の浸透解析を行う。このような解析方法はすでに，土中の浸透で用いられていた方法であるが，その際には，飽和領域の要素分割を自由水面上で圧力水頭が零を満足するように上下に移動させる方法が一般に用いられた。この方法は土に対しては，地盤が均質な場合にだけ適用されるものであり，地盤が不均質であれば，地層の座標も移動してしまうために本質的に解析が不可能である。一方，岩盤の割れ目ネットワークでは，当然，地盤は不均質であるため，分割要素を移動させる方法は適用できない。

本研究では，このような難点を克服するために下記の手法を開発した。

(1)地盤の割れ目ネットワークモデルより自由水面を仮定して，自由水面下の領域を取り出す。（図－２参照）

(2)自由水面と交わる要素の交点に新しく節点を設ける。

(3)自由水面内の要素番号，節点番号を付け変える。

(4)有限要素法による解析でのバンド幅が最小になるように節点番号を付け変える。

(5)自由水面では不透水境界条件とし，定水位境界，不透水境界の条件を満足する割れ目の交点での節点の全水頭を数値解析より求める。

(6)自由水面上の節点の全水頭が位置水頭に等しいかを判定して，自由水面の位置を圧力水頭が零になるように移動する。ただし，自由水面の位置は，領域を数ブロックに分割する直線（Transverse line）に沿って移動させるものとする。

(7)解の振動を防止するために，図－４で示すように，それぞれの節点での圧力水頭を零にするように移動させたa′，b′，c′，d′，e′と分割直線の交点をＩ，Ｊ，Ｋ，Ｌとすると，新たに仮定する自由水面の位置は，図－４のK-lineとK′-lineの平均値である（Ｋ＋１）lineと定めた。

(8)新たに定められた自由水面を元の割れ目ネットワークに定め，再び飽和領域を取り出し，自由水面と交わる要素の交点を新しい節点として，(3)～(5) の操作を繰り返す。

自由水面の移動が許容誤差 ε になるまで上記の手法を繰り返し，自由水面の位置を求める。図－３にフローチャートを示す。

なお，この方法は，土中の浸透においても，不飽和領域を考慮する必要のない浸透（砂レキ中の浸透）で不均質な地盤においての自由水面下の飽和領域のみを対象とした浸透解析や不均質な被圧帯水層での

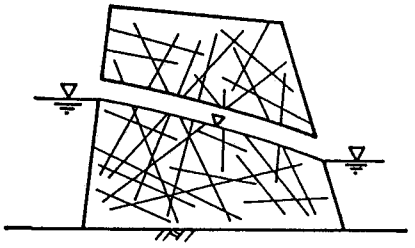

Fig.2 Fracture model

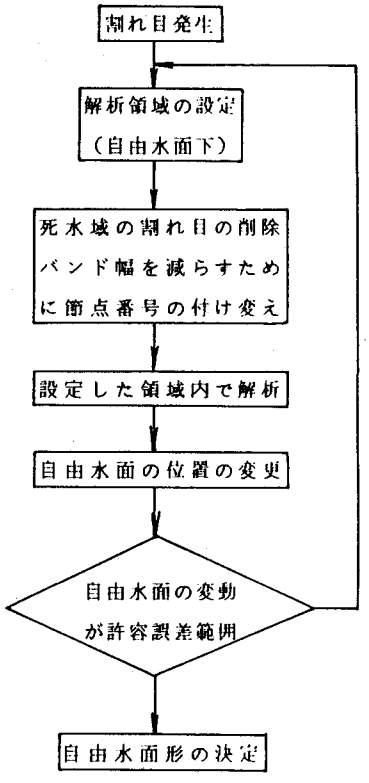

Fig.3 Flowchart

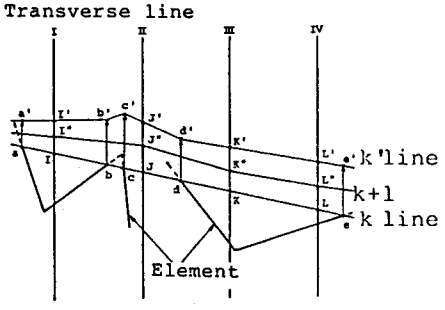

Fig.4 Freesurface shifting

2相流体の浸透解析にも適用できる。ただ，自由水面が複数できるような浸透解析は困難である。

4．解析と実験との比較

ここで示す解析方法の妥当性を検討するために，室内実験結果との比較を行う。実験では長さ 160cm，高さ80cm，厚さ 3.5cmのアクリル板内に幅 1.3mmの割れ目を上下に5cm間隔に設けて，上流側が71cm，下流側が21cmの水位固定条件で自由水面を有する流れを起させた。図－5に境界条件を示す。

図－5の格子状の割れ目を節点総数 558，要素総数 976の要素分割でシミュレーションした。なお，トランスバースラインは33本とし，初期の自由水面形は上流から下流へと直線で結んだものを用いた。

図－6に解析結果と実験結果との比較を示すが，ここでは繰り返し計算が6回で自由水面上の最大誤差が 0.7cmほどとなり，解析結果は実験値と良く一致していることがわかる。

5．解析例

(1)割れ目内の浸透解析

解析の妥当性を検討するために格子状の割れ目モデルとの比較を行ったが，一般的な割れ目モデルについても解析した例を示す。

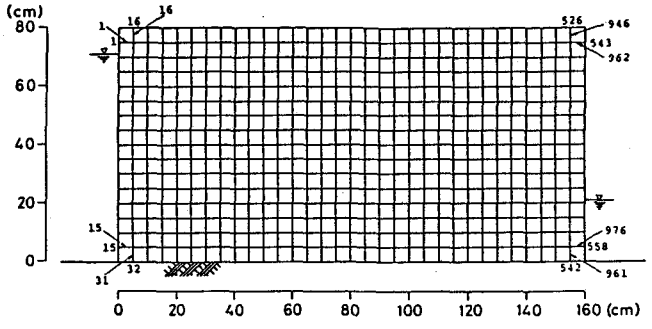

Fig.5 Numerical fracture model for experiment

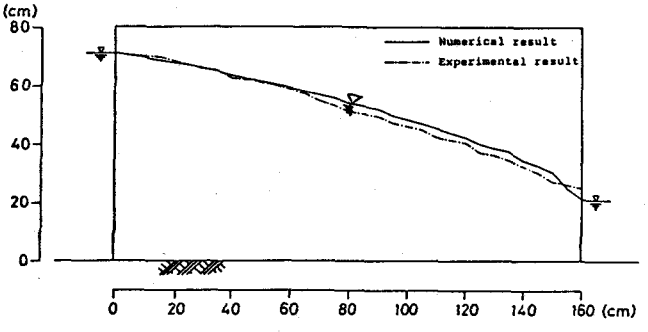

Fig.6 Comparison of experimental and numerical results (Steady method)

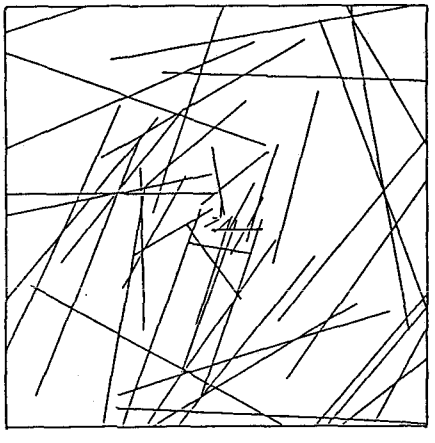

Fig.7 Random set fracture model

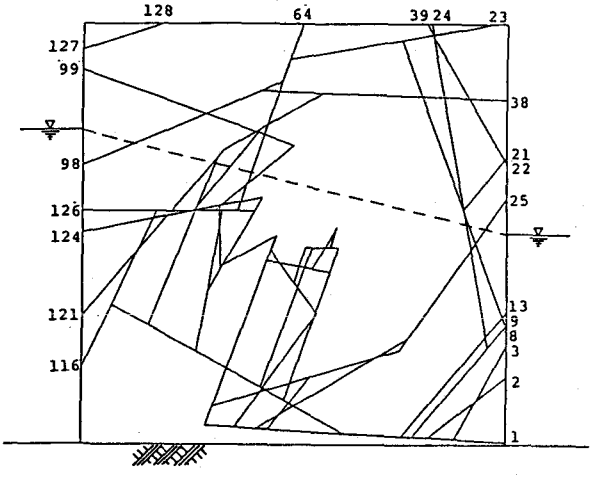

Fig.8 Reduced fracture model

図－７は割れ目ネットワークであり，図－８には浸透に関係のない割れ目要素を削除した結果を示す。また，この系を基に浸透解析した結果を図－９に示す。この解析では，最終的には 128節点，要素総数 191で，21本のトランスバースラインを用いた。トランスバースラインを密に用いると自由水面の形状はスムーズになる。

(2)トンネルへの浸透

図－10の割れ目ネットワークの地盤にトンネルを掘削したことによる，自由水面の低下を図－11に示す。

6．おわりに

割れ目系の岩盤内で自由水面を有する浸透解析手法について，新しい手法を示した。しかし，この解析は，鉛直２次元モデルであり，本来の３次元場への拡張方法について今後研究を続ける予定である。

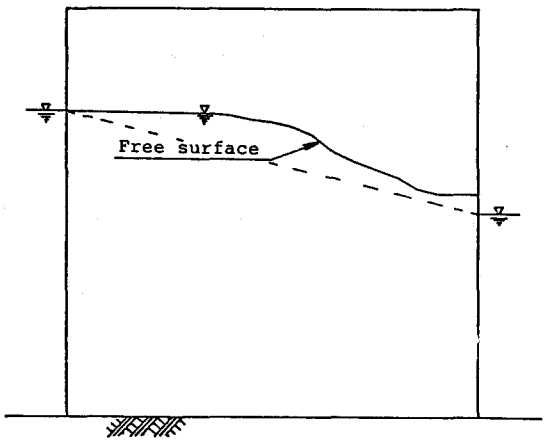

Fig.9 Free surface in random fracture model

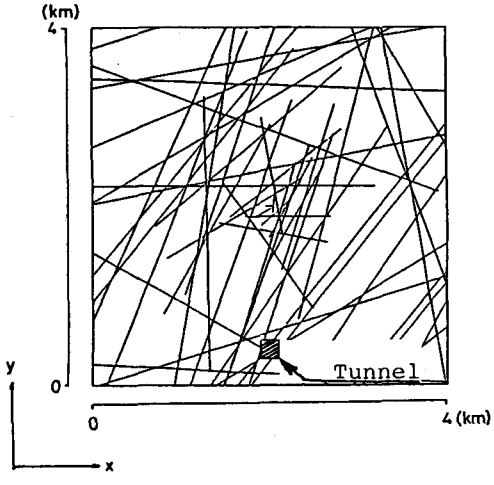

Fig.10 Tunnel model

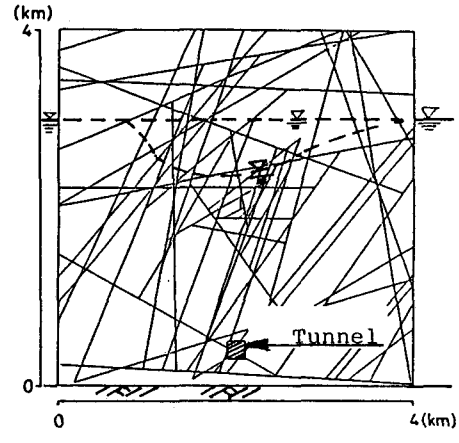

Fig.11 Free surface in random fracture with tunnel

[参考文献]

1)Long,J.C.,J.S.Remer,C.R.Wilson,P.A.Witherspoon:Porous media equivalents for networks of discontinuous fractures,Water Res.Res.Vol.18,No.3.pp.645-658,1982.

2）大西，西野：岩盤調査による割れ目情報を利用した岩盤浸透解析，第16回岩盤力学に関するシンポジウム，pp.76-80,1984.

3)Samsniego,J.A.,S.D.Priest:The prediction of water flows through discontinuity networks into underground excavations,ISRM Sympo.,Cambridge,UK.,1984.

4）川谷，北村：二次元亀裂が発達した岩盤内の浸透流の数値シミュレーション，第39回土木学会学術講演会講演概要集，II-657-658,1984.

5)Ohnishi,Y.,H.Shibata,M.Nishigaki:Finite element analysis of in regularly jointrd rock mass. Fifth International Conf. on Numerical Methods in Geomechanics/Nagoya/,pp-673-680,1985.

(71) ANALISIS OF WATER FLOWS WITH FREE SUFACE THROUGH NETWORKS OF DISCONTINOUS FRACTURES

M.Nishigaki
Department of Civil Engineering, Okayama University
Y.Ohnishi
Department of Civil Engineering, Kyoto Universuty
T.Kawabe
Saeki Kensetsu Kogyo Co. LTD

SUMMARY

A computer model for the calculation of fluid flow with free surface through a random, two-dimensional discontinuity network is described.The validity and accuracy of the new code are verified by the results of experiment which is a simplified regularly jointed rock mass model(160cm long,80cm high).

Some case studies, a free surface flow in a random discontinuity network and a tunnel excavated through a water bearing, are presented to illustrate the practical application of the model. This study involved the collection of discontinuity data from bore holes and from exposed faces, and the assessment of local groundwater conditions, to obtain predictions of free surface behavior and water inflows at the tunnel face.