

自動要素分割によりモデル化した
亀裂性岩盤のDEM解析

木山 英郎・藤村 尚・西村 強*・川崎 了

海洋土木工学科, *土木工学科

(1987年9月1日受理)

Distinct Element Analysis of Fractured Rock Mass
with the Auto Element Tessellation

by

Hideo KIYAMA, Hisashi FUJIMURA, Tsuyoshi NISHIMURA* and Satoru KAWASAKI

Department of Ocean Civil Engineering

*Department of Civil Engineering

(Received September 1, 1987)

The distinct element method (DEM) has the essential applicability for analysis of fissured rock structures. It is a problem how suitably and easily an element assembly of an analytical model is set up from in situ data of discontinuities in a given rock mass.

This paper describes an auto element tessellation method by using a personal computer system. It is convenient that the input data of discontinuities can be given either by video images of rock surfaces or by a conventional stereographic map.

The element assembly of a fissured rock mass obtained by this method was subjected to the DEM analysis by the personal computer and in consequence the validity of this auto tessellation method was confirmed.

Key words : DEM, Fissured rock, Auto element tessellation

1. 緒 言

岩盤には節理を始めとし様々な成因形態を有する不連続面（我国では慣例により割れ目と呼ぶ）が存在する。したがって岩盤の強度・変形特性は岩石ブロックの物性（岩質特性）と、それを取り囲む割れ目の特性とによって支配される。従来の岩質特性にのみ注目した連続体的取扱いに代って、近年は岩盤の不連続性を考慮した解析が注目され始め、解析における不連続性の定量的表現が重要となってきた。連続体を仮定する有限要素法（FEM）において、岩盤の不連続性を考慮する場合には、シュミットネットあるいはウルフネットによって表示された割れ目の卓越方向や分布密度に関するデータから平均的な要素定数に換算する方法が一般的である。すなわち、個々の割れ目の方向性や分布密度を直接要素分割等に用いることは不可能に近い。

一方、Cundall¹⁾の提案した離散剛要素法（DEM）は、割れ目で区切られた岩石ブロックをそれぞれ要素として解析できる点で、FEMなどと違い、割れ目データを直接要素分割に活し得る特徴を持っている。したがって、たとえばシュミットネットやウルフネットで与えられる割れ目データからDEM用の要素分割を簡単な操作で行い得る手法の開発が必要となる。本研究はこのような目的にパソコンの図形処理機能を利用する方法を論じたものである。

2. パソコンによる自動要素分割

2-1 概要

DEMは不連続面で区切られた要素の集合体に対し、個々の要素が運動方程式を満足し、要素間の力の伝達が作用・反作用の法則に従うことを条件として、集合体の動力的挙動を解析する手法である。DEMでは、割れ目に区切られた岩石ブロックをそれぞれ要素とすればよい。その際問題は、実際の亀裂性岩盤についての適切な割れ目分布の表現と要素入力データ作成の自動化である。本研究では、現場の割れ目データをもとに、パソコンの図形処理機能を利用して実際の岩盤状態に近い割れ目の立体モデル図を作り、任意の裁断面上の割れ目線図を求めることによってパソコンのディスプレイ上で要素分割ならびに入力データ作成を行う方法を検討する。

現場の割れ目データは、通常のステレオグラフによる

ものの他、新たにビデオ録画による方法を探り挙げた。両者の処理手順の概略は、図-1のフローチャートに示すようである。

パソコンシステムは、PC-9801VM2（1MBミニフロッピディスクドライブ2台内蔵）、15インチカラーディスプレイ、X-Yプロッタ、プリンタ、マウス、ビデオデッキから構成されている。また、データ処理時間の高速化とプログラムやデータファイルの管理の効率化を考えて、OSとしてMS-DOSを採用している。

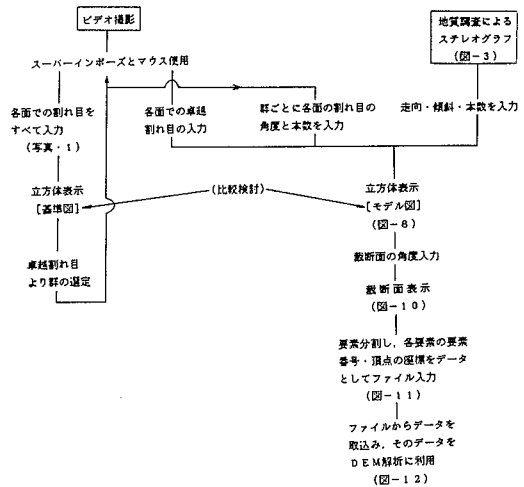


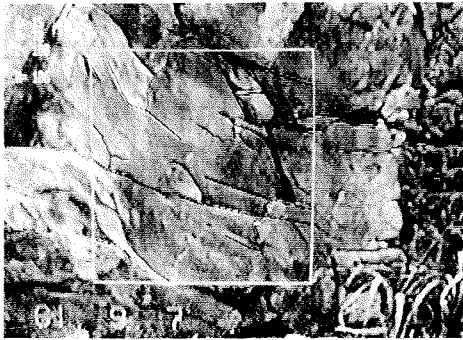
図-1 自動要素分割の流れ図

2-2 ビデオ録画の利用

ビデオカメラで撮影した実岩盤の映像から、図-1（左列）に示す手順で岩盤立方体表面の割れ目図を作成する。たとえば写真-1は、ある岩盤露頭面の映像に、マウスとスーパーインポーズ機能を用いて忠実に割れ目を追跡している様子を示す。このようにして直交する3つの面上の割れ目模様を写し取ることによってパソコンのディスプレイ上に、立方体表示ができる。これは、与えられた実岩盤の表面的な割れ目模様の忠実な再現図となるが、岩盤内部での割れ目のつながりや消滅は不明であり、それらを合理的に判断し、岩盤立方体を横切る主たる割れ目や割れ目群を選び出す必要がある。

さらにまた、解析の通常目的からすれば、ここに得

た観察岩盤の割れ目状況そのものよりも、それを一例とする周辺岩盤の平均的な（統計処理された）割れ目モデルの作成が必要となる場合が多い。したがって、ここに得た割れ目の立方体表示は、後述の統計処理によって作り出される割れ目の立方体表示モデル図に対する比較検討のための基準図の役割を第一と考えている。



写真・1 ビデオ撮影した岩盤と割れ目

さて、前述の方法で岩盤立方体を横切る割れ目が選定されたでしょう。このような広がりを持つ割れ目は通常、互いに平行な群をなす。そこで、ほぼ平行とみなされる割れ目について、これを1つの割れ目群とみなし、改めて第1面から、第2面、第3面についてマウスでトレースし、図-2に示すように、各面での平均的な θ_1 、 θ_2 、 θ_3 とその面での割れ目数を読み取る（マウスでトレースすることによって自動的にデータ化される）。割れ目群は通常3群、ときにはそれ以上存在するが、それぞれについて同様な手順を繰返せばよい。

なお、第3面の映像がない場合や、第3面での角度が読み取れないときは、次式から θ_3 を決定することができる。

$$\theta_3 = \tan^{-1}(-\tan(\theta_1)/\tan(\theta_2)) \quad (1)$$

このようにして得られた割れ目群に関するデータから割れ目を立方体表示する方法はつぎのようである。

ここでは、座標の原点を立方体の中心とし、立方体の一辺の長さをパソコンのディスプレイ上で200ドットとした。角度 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 を有する割れ目群の平面の方程式を $ax+by+cz=d$ とすると、

$$\begin{aligned} a &= 1/\sqrt{1+\tan^2(\theta_1-\pi/2)+\tan^2(\theta_2-\pi/2)} \\ b &= \tan(\theta_1-\pi/2)/\sqrt{1+\tan^2(\theta_1-\pi/2)+\tan^2(\theta_2-\pi/2)} \\ c &= \tan(\theta_2-\pi/2)/\sqrt{1+\tan^2(\theta_1-\pi/2)+\tan^2(\theta_2-\pi/2)} \end{aligned} \quad (2)$$

と決定できる。また、 d は実測値を用いる。

この結果、たとえば、図-2で第1面に表れる割れ目は $z=100$ の立方体平面と上記の平面との交線の方程式で与えられる。このようにして後述図-6のような割れ目の立方体表示がディスプレイ上に得られる。

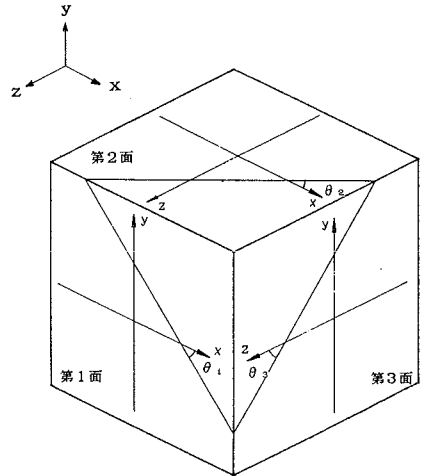


図-2 割れ目の立方体表示説明図

2-3 ステレオグラフの利用

ステレオグラフを用いた自動要素分割については、図-1の右側の手順に沿って説明する。

前述したビデオによる方法は、トンネル切羽とか斜面とか特定された岩盤を対象にした場合には最適の方法であると思われるが、ダム基礎岩盤のような広い領域の岩盤地質調査においては、割れ目の方向、密度等がステレオグラフの形で与えられるのが普通である。図-3はそうした調査結果の一例で、岩盤は、3つの割れ目群からなり、それぞれの群の走向、傾斜角の平均値を用いて3つの割れ目面を3つの点として与えている。この点の幾何学的意味は、つぎのようである^{2, 3)}。図-4が前述点

と水平面上での割れ目の方向（走向）の関係を表しており、図-5が鉛直面上での割れ目の傾斜角を表す。

たとえば、走向を θ_1' 、傾斜を θ_2' とすると、1面での角度 θ_1 、2面での角度 θ_2 は、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \tan^{-1}(\tan \theta_2' \cdot \sin \theta_1') \\ \theta_2 &= \theta_1' \end{aligned} \quad (3)$$

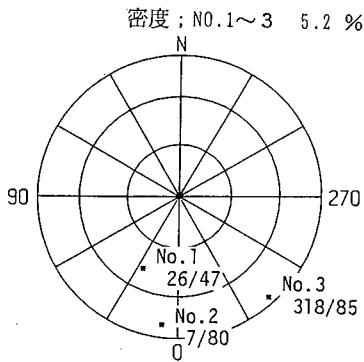


図-3 割れ目のステレオネット表示

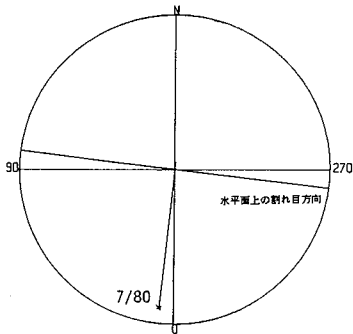


図-4 水平面上の割れ目方向（走向）

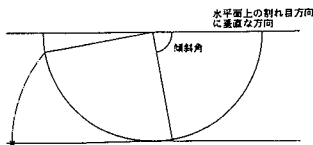


図-5 割れ目の傾斜角

式(2)に θ_1, θ_2 を代入すれば、割れ目を表す平面群の法線ベクトルが決まる。つぎに、割れ目の本数からつぎのように d の値を決定する。

図-6のように、この立方体の頂点（あるいは辺）に接する平面Aの方程式を求める。このような面は、原点Oに関して対称な位置にも存在する（図-7）。その割れ目の群の本数 n （ n =観察された割れ目の総数×群の存在率）であるとすれば、図-8の $\overline{PP'}$ 間に点 Q_i （ $i=1, 2, \dots, n$ ）を等間隔に設ける。点 Q_i を中心として両側の長さ L の区間をとり、乱数を用いてこの区間内に点 R_i を決める。点 Q_i すべてについて同様の操作を繰返すことによって、1つの群に属する n 個の割れ目が平面群として立方体内に表現される。

このとき i 番目の割れ目に対する d の値は乱数RNDを用いて次式で与えている。

$$d = 0R_i = 2D \cdot i / (n+1) - (D+L) + 2L \cdot \text{RND} \quad (4)$$

$\overline{PP'}$ を1区間として、乱数により d の値を決定することも考えられるが、この方法によると割れ目が一部分に集中してしまう場合がある。割れ目が集中すると裁断面に現れる要素が小さくなりすぎ、DEM解析を行うとき問題となる。そこで、本研究では前述のような等間隔分布を基本とした分散方法を採用した。

このようにして、図-3のステレオグラフで得られた割れ目のデータを用いて割れ目の立方体表示した結果を図-6に示す。

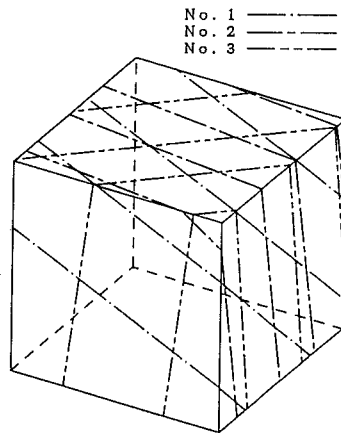


図-6 割れ目の立方体表示

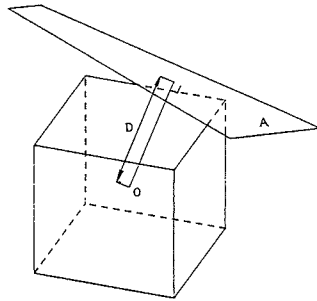


図-7 割れ目の間隔

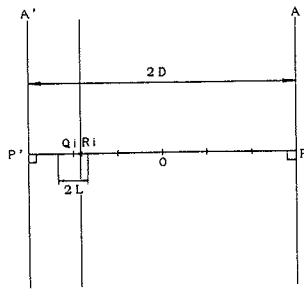


図-8 dの決定法

2-4 裁断面

立方体内部に不規則に存在する割れ目を2次元解析するために、立方体のある1つの平面(裁断面)で切り、そこに現れる割れ目を考えることにする。裁断面は、たとえば図-9のABCDで示されるような平面である。この平面と各割れ目との交線を探り、裁断面上に表示する。この裁断面は、立方体の中心点Oを通り角 α で与えられるものとし、通常垂直な断面を仮定する。これは2次元解析において、重力の方向と平行な面を代表面に考えることが多いことによる。

図-10は、図-9において裁断面($\alpha=30^\circ$)を正面に向けたときの裁断面上の割れ目である。これは、パソコンの図形処理機能を利用して容易にプログラムできる。

この裁断面上の割れ目図がDEM解析のための初期要素分割を示す。ここで要素番号と各要素の頂点の座標、要素面積、重心、要素形状定数等も自動的に計算される(図-11)。

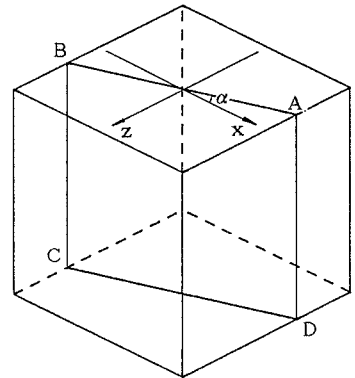


図-9 裁断面(ABCD)

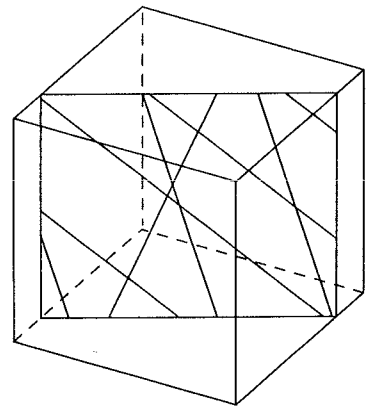


図-10 裁断面を正面に向けたときの割れ目

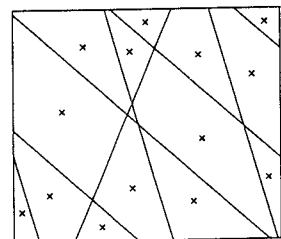


図-11 自動要素分割により求めたモデル岩盤

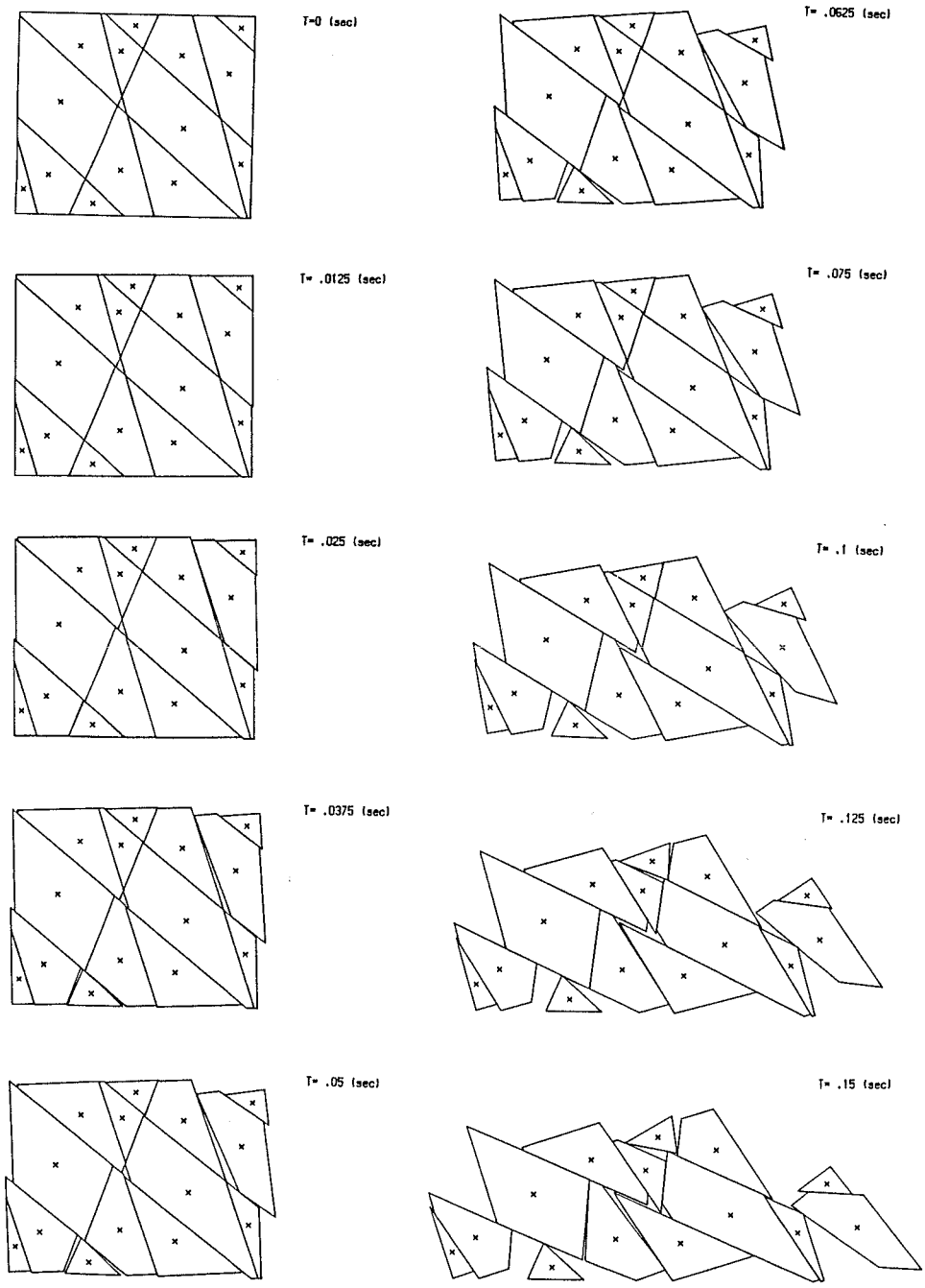


図-12 DEM解析例

3. DEM解析への適用例

以上のようにして得られた図-11の要素分割データ(要素数14個)に続けて、パソコンによるDEM解析を行った。その解析結果を図-12に示す。

この解析は、水平面上にモデル化された岩盤ブロックの集合体を静かに置いた状態($t=0.0\text{sec}$)から開始し、時間の経過とともにブロックが破壊していく様子をシミュレートしたものである。なお、要素の大きさは最大縦9cm×横10cmとし、接触定数⁴⁾は円形要素の場合と同一の $k/\rho g=36400(\text{cm})$, $\eta/\rho g=16.2(\text{cm}/\text{sec})$, $\Delta t=0.00005(\text{sec})$ とした。

解析結果は、ほぼ満足できるものであり、自動分割によって得られたモデルがこの程度の要素数のDEM解析に対し十分適用できることが実証された。

4. 結 語

本研究は、パソコンによる実地盤の亀裂データからの自動要素分割システムの開発を行ったものである。あわせてDEM解析への適用例を示した。得られた結果をまとめると以下の通りである。

1) 岩盤が、2ないし3方向から観察できるとき、ビデオ録画をもとに任意の裁断面に現れる割れ目の分布図を作成し、自動要素分割に供することが可能である。

2) 1)で述べたような観察が不可能であるとき、地質調査から得られる割れ目分布のデータ(ステレオグラフ等)を利用して、同様の処理が行えることを示した。

3) 自動分割によって得られた亀裂性岩盤モデルが、DEM解析に十分適応できることが実証された。

割れ目の方向・密度のほか、割れ目の広がりなどの因子も取り入れられれば、さらに現場の岩盤に近い状態でモデル化できると考えられる。また、大型の電子計算機によるDEM解析のための数百という多数要素への本手法の拡張が今後の課題である。

参考文献

- 1) Cundall, P.A.: A Computer Model for Simulating Progressive, Large Scale Movements in Blocky Rock Systems, Symp. ISRM, Nancy, France, Proc. Vol.2, pp.129 ~136, 1971.
- 2) 菊池宏吉: ダム基礎岩盤の地質工学的評価に関する研究, 1979.9.
- 3) 菊池宏吉: 不連続性岩盤の地質調査とその結果の評価, システム総合研究所, 実務家のための岩盤工学セミナー, pp. 30~60, 1985.5.
- 4) 木山英郎・藤村尚: カンドルの離散剛要素法を用いた岩質粒状体の重力流動の解析, 土木学会論文報告集, 第333号, pp.137~146, 1983.

