

(50) 底面摩擦模型実験のための
画像解析装置の試作

九州大学工学部 正会員 江崎 哲郎
正会員 木村 強
学生会員○矢野 和文
学生会員 三谷 泰浩

The Picture Analyzing System for Base Friction Scale Model Test

Tetsuro ESAKI, Tsuyoshi KIMURA,
Kazufumi YANO and Yasuhiro MITANI
Faculty of Engineering, Kyushu Univ.

Abstract

Though the base friction technique supplying air pressure can realize a quantitative scale model test under gravity prominent field, numerical and graphical representations of quantitative test results are extremely limited. This paper develops the picture analyzing system for the model test. Record of experimental result is done optically with a camera which is attached above the model and can be automatically moved to two direction, and with a video floppy recording system with a high accuracy. The deformation of each point of model is measured at the splitting pictures on the CRT with a precision of 0.1 mm. Crack propagation and failure development of model in each stage are traced and are outputted. The remove of rock mass in the model are also recorded assuming each mass to behave as rigid body and the failure process is explained by sequential remove of each block.

1. はじめに

底面摩擦模型実験は、重力場における、比較的浅い被りの地下空洞の挙動をシュミレートするのに適した模型実験手法の1つである。その特徴を挙げると、まず、重力場の効果を任意に制御できることである。底面摩擦装置では重力相当の物体力を模型底面に作用する摩擦力によって発生させる。その摩擦力は模型表面に付加する空気圧を調節して制御される。第2は、経済性および簡便性である。例えば遠心力のような巨大な模型装置は維持費も含めて高価であり、模型作製や実験の作業も煩雑である。第3に、ジャッキ試験のように破壊時に急激な慣性力が作用しないことが挙げられる。これは、重力相当の物体力の発現を安定した摩擦力によっているためである。第4は、相似則がよく成立するので定量的実験が実現できることである。そして幾何学的、力学的なパラメータを変化させた定量的な実験が、少ない実験数で行える。さらに重要な特徴として、変形、破壊の逐次的な変化を視覚的に捕らえることができるゆっくりした速度で連続して観察できることである。

しかしながら、このような簡易でかつ高精度な模型実験手段であるにもかかわらず、現状ではデモンストレーション的色彩のみが強い。これは定量的実験を記録する手段がビデオや写真などに限られており実験結果の定量的検討を行う上で大きな障害となっているためと思われる。この記録手段として、Eggerは高精度写真と電算機処理による画像解析を試みているが実用にはなっていない¹⁾。我々も写真のネガを工業用顕微鏡でデータを読み取る方法を採用してきた²⁾が得られる情報が変位のみであり、その作業も極めて手間を要する。また、破壊の進展などの模型挙動の記録、再生は書き写しなど原始的に行っており、正確さ、効率および客観性において多くの問題がある。今回、実験結果を正確にかつ効率的に解析する手段として画像解析装置を試作した。

2. 底面摩擦模型実験と従来の解析法

底面摩擦模型実験は、標点（直径1mmの散弾）を設けた模型試料を低速で移動する摩擦板（以下、プレートと呼ぶ）の上に置き、空気圧を段階的に増加させ各段階での模型の挙動を調べてゆく。模型に作用する摩擦力の合力は、フレーム端部に取り付けたロードセルで計測するが、ある一定の空気圧の下でプレートを移動していくと、摩擦力が徐々に増加し数秒後に一定になる。この一定になった状態でしばらくすると模型の動きが終息する。この終息した状態でプレートの移動を一時停止して、静止画像（一画面）を35mmカメラで撮影し、亀裂をフリーハンドでトレースする。そして空気圧を段階的に増加させ、空洞の変形、破壊が進行を終了するまで、この過程を繰り返す。実験終了後、フィルムを現像し、そのネガフィルムの画面を、移動テーブル付きの工業用顕微鏡で標点を読み取る。具体的には、模型表面にあらかじめ設けておいた基準点を接眼レンズのクロスを中心に合わせ原点とする。次に各標点にクロスを合わせ、そのX、Y座標を読み取る。読み取りの精度は1/1000mmである。これを実験の各段階毎の全標点について計測し、初期状態の座標値と各段階の座標値との差を計算し変位とする。その変位から応力を求める。一方、ビデオカメラを用いて実験の全過程を磁気テープに収録する。これによって模型挙動の初期状態から空洞崩落までの変化の連続したプロセスが記録される。

3. 従来の方法の問題点と画像解析装置の要件

従来の方法には多くの問題点を挙げることができる。

- (1) 実験データの記録性、再現性が良くない。
- (2) フィルムの現像、印画紙への焼付けが即時にできない。また、写真は、亀裂の進展や破壊過程を検討する上では定性的には、“見れる”だけで、明確な線図化ができない。
- (3) 模型の全体像を35mmのネガフィルムに縮小し、それを顕微鏡で拡大して観察するのは、所定の精度は得られるが顕微鏡で観察できる視野が限られており不便である。また、顕微鏡のクロスを標点に合わせる作業および計算機への入力は大変な労力を要する。
- (4) ネガフィルムから得られるデータが標点の座標のみであるために解析が限られてしまう。
- (5) 亀裂、破壊の状況をトレースするのは主観性が入りかつ多大な時間を要する。
- (6) ビデオ録画は破壊開始の場所や時期を調べるなどに使う以外には、画質も劣るので、いわゆるデモンストラーションにしか用いることができない。

以上のことから以下の要件を満足することを目標に画像解析装置の試作を行った。

- (1) 精度の良い画像を記録できること、また再生等が、繰り返し容易にできること。
- (2) 記録画面を用いて、多種にわたる処理が効率的にできること。またなるべく客観的な判断で処理できるようにする。
- (3) 解析処理を行った結果は、数値または図として、CRTや紙面上の情報として出力させる。
- (4) 画像処理は、①模型の変形を数値的に表示し、変形や応力のベクトル、分布図として出力する、②亀裂の伸展を実験の各段階毎に表示し、図面上にプロットする、③亀裂や層理面などの不連続面をはさむ2地点の相対的運動を計測する、④剛体とした岩盤ブロック（複数）の運動を段階毎に表示する、などが可能なこと。
- (5) 以上のことが、経済的にかつ容易な作業で行えること。

4. 画像解析装置

4.1 装置の概要

装置の構成をFig.1に示す。装置は2つのブロックに大別される。1つは画像を撮影して記録する収録ブロック、もう1つは再生画面を解析処理する解析ブロックである。収録ブロックは各模型の上面で、アクチュ

エータに取り付けられたカメラで分割画面を撮影し、ビデオフロッピーに収録する。解析ブロックは画面を再生し、種々の解析機能を用いて解析作業を行い結果を出力する。

4. 2 収録ブロック

分割画面の数は計測精度によって決まり精度を高めるときは分割数を多くする。アクチュエータの位置精度は1/1000mmであり、移動量および移動速度はパソコンおよびティーチングボックスにより制御する。ビデオフロッピーシステムは、1枚に最大50画面の静止画像を記録できる2インチビデオフロッピーをリモコンで操作して収録する。

4. 3 精度検定

CRT画面に写し出された画像を処理する際には、例えば標点等にマウスカーソルを合わせる場合、計測精度はCRT画面の最小単位である画素に支配される。したがって、画面に表示する大きさで測定の最小単位は決まる。また、測定には機械的の誤差が生じる。その影響因子としカメラのレンズのひずみ、アクチュエータの移動精度、カメラの中心軸のずれなどがある。これらの誤差と精度について次のような検定を行った。まず、長さが検定されたスケールを模型の水平、垂直におき所定の間隔で分割撮影してその画面上の座標をマウスで入力させる。その値を用いて基準点からの長さを計算して正しい値と比較した。Fig.2,3は1撮影画面および連続した画面において画面の中心から水平、垂直方向に5mmの間隔で設けた標点の位置を入力するときに生じる誤差を示した。図面の1点鎖線は1画素の幅を示す。Fig.3の点線は各画面の中央線を現す。図より2方向ともに誤差は1画素以内に収まっている。したがって、同一画面内および連続画面では1画素の幅に相当する精度（この場合、0.120mm/dot）が保証されている。

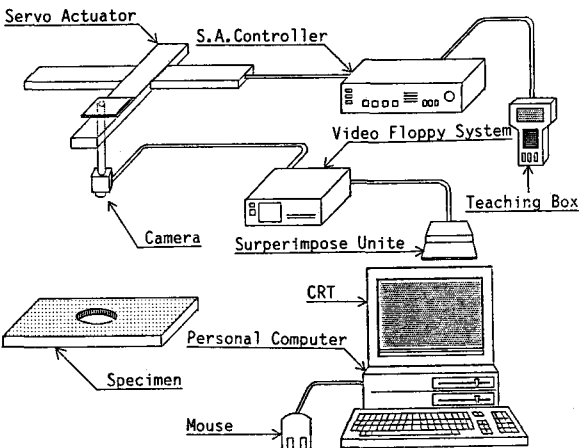
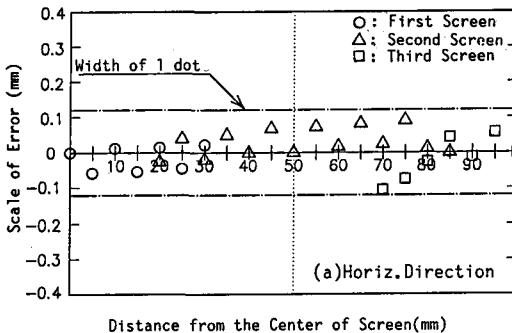


Fig.1 The Picture Analyzing System.

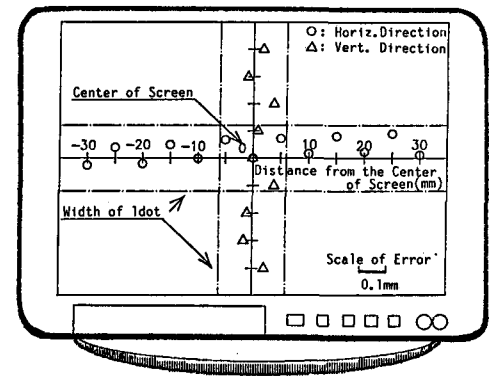


Fig.2 Reading Errors within 1 Screen.

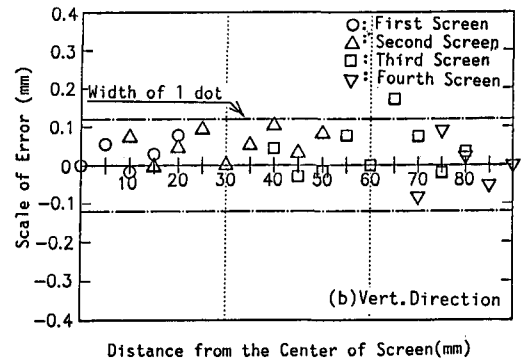


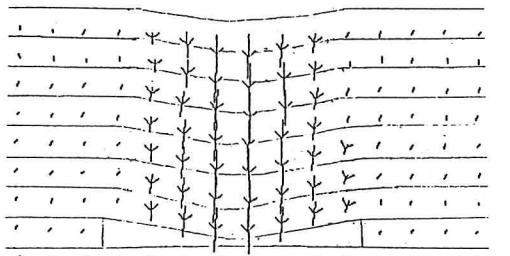
Fig.3 Reading Errors between Splitting Pictures.

4. 4 解析機能と解析例

Photo.1に示すような層状岩盤の模型実験結果を例にあげて画像解析を行った。模型は、石コウ:石灰:水=1:3:4（重量比）の配合で、層理面間隔が2cmの層状岩盤である。空洞は、幅15cm、高さ2cm、深度14cmである。幾何学的縮尺を1/100とすると実際の岩盤で深さ14mの空洞天盤に生じる垂直応力は 3.5kg/cm^2 であり、模型では空気圧が 0.2kg/cm^2 （垂直応力 $=0.77\text{kg/cm}^2$ ）のとき亀裂が発生し、空気圧が 0.4kg/cm^2 （垂直応力 $=1.54\text{kg/cm}^2$ ）のとき写真のような最終的な破壊現象を示した。以下、解析機能と解析結果について示す。

(1)変形解析機能

実験の各段階での標点の座標を入力し、その変位増分を求める。また応力も求める。Photo.2は標点の座標を入力中の画面である。入力は拡大された模型表面の標点にマウスカーソルを合わせる。マウスカーソルは標点形状によって読み取り誤差を小さくするために数個の形が用意されている。出力は、数値リスト、変位および応力についてのベクトル図、分布を示すコンター図が用意されている。Fig.4に変位ベクトル図を示す。



100mm 左下座標 [-2.3, -85.8] 矢印強調度 [4]
Fig.4 Deformation Vector.

(2)局所変形解析機能

この機能は特定の領域に注目しその領域の局所的な変位を計測する。例えば、亀裂や層理面などの不連続面をはさむ2地点の座標から不連続面の相対的な移動を求める。Photo.3はその亀裂をはさむ2地点の座標を読み取っている画面である。

(3)亀裂解析機能

亀裂の伸展を実験の各段階毎に表示し、図示する。Fig.5は各段階毎の亀裂の伸展状況を示す。入力には亀裂の始点から分岐点および終点までマウスカーソルを動かしてその2点間を結ぶ。これを各段階で別して表示する。

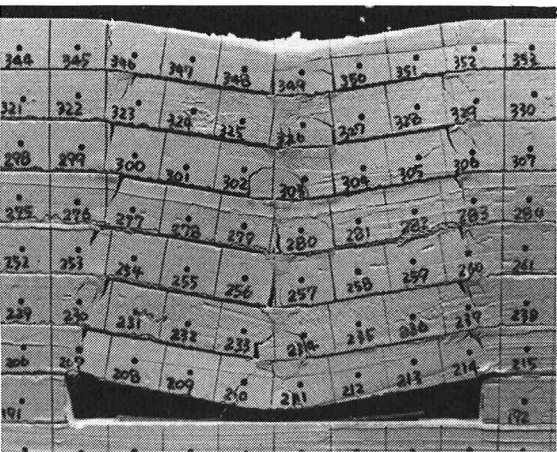


Photo.1 Result of Model Test in Horizontally Layered Rock.

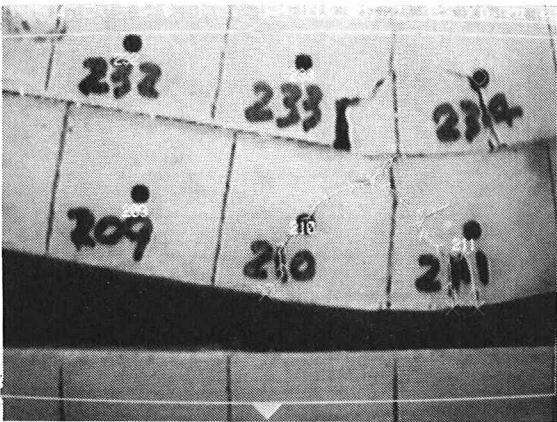


Photo.2 Input of Coordinates of Measuring Points and Crack Propagation.

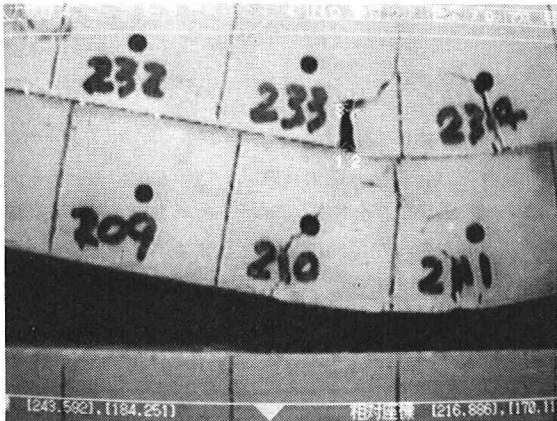


Photo.3 Input of Width of Crack.

(4) 剛体挙動解析機能

この機能はジョイント等で分離している不連続な岩盤の各ブロックを剛体として仮定し、各剛体岩盤ブロックがどのような動きをするかをCRTおよび紙面上に連続的に表現するものである。入力は剛体の形状をマウスカーソルで多角形で囲みその内部に標点を2点指定してその標点の入力を各段階で行えば剛体の連続的变化を表示できる。例として、空洞天盤のブロックの崩壊状況をFig.6に示す。

以上、既に関与された機能を示したが、精度よい画面が保存されているので、これら以外でも多くの解析、後処理が可能である。また、理論解析との対比も容易である。

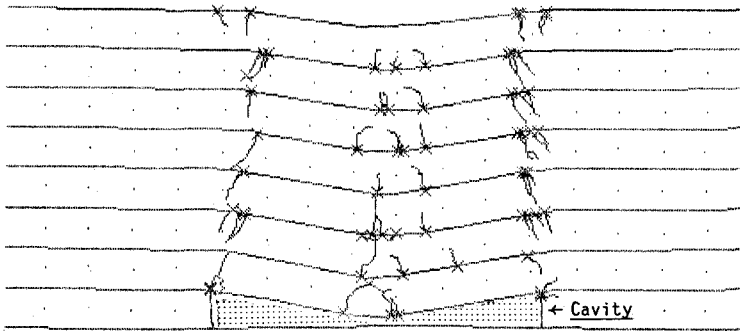
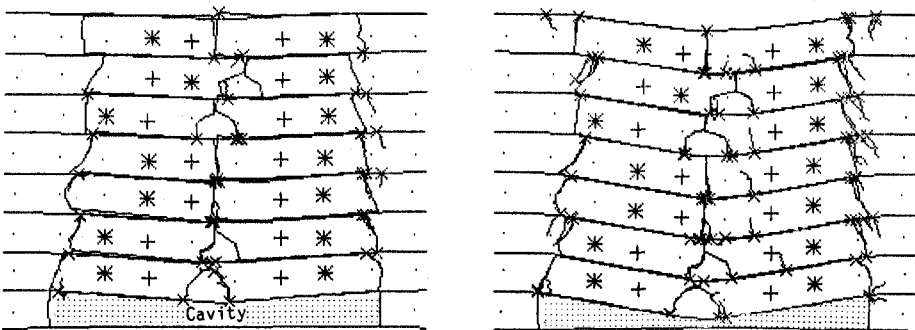


Fig.5 Trace of Propagation when
Air Pressure is 0.4 kg/cm^2 .



(a) Air Pressure = 0.3 kg/cm^2 . (b) Air Pressure = 0.4 kg/cm^2 .

Fig.6 Remove of Rock Mass at the Roof.

5. まとめ

底面摩擦模型実験において、実験結果を数値および図形により定量化して効率的に処理するための画像解析装置を試作した。この装置は、ビデオフロッピーに画像を収録し、パソコンと連結して後処理を行い模型の変形、破壊の挙動特性を解析するものである。実際の例に適用した結果、所定の精度が得られ、実験結果の効率的な処理が可能になった。今後、解析機能の充実を図るとともに、F.E.M.解析等の理論解析との対比が同時に出来るようにする予定である。また、この画像解析装置は計測が解析対象と非接触であるため他の計測への適用も検討中である。

参考文献

- 1) Egger, P. :Int. Colloquium on Physical Geomech. Models, ISMES, Bergamo, P. 76, 1979
- 2) 西田 正他:九州大学生産科学研究所報告, 75号, 1-10, 1983