

地下空間の周辺地山の挙動に関する模型実験

国立大分高専 正会員 相川 明

1. はじめに 今後の地下利用では、地表の社会環境および地中の既存構造物との相互影響を考慮した設計・施工が要求され、計画、建設、供用、廃棄に至るまでの周辺環境との調和をはかることが必要である。しかしながら、現状では社会的な面においても、あるいは、力学的な面においてもその影響度の解明が十分とはいえず、総合的な評価法も確立されていない。

本研究は、最初の取り組みとして、大きさや形状が異なる地下空間が、上下や左右に平衡でない状態で、互いに近接する場合の相互影響性を実験的に検討する。すなわち、地山条件に符合する模型材料により挙動を調べて、現象に関する問題点を考える端緒とする。

模型実験には各種のものが利用されているが、三次元的な挙動をみるには遠心装置が最も有利である。本報告は、当研究室で開発した小型の装置により、まずは単一トンネルの挙動の再現性と、実験の精度向上について考える。なお、単一トンネルの解析に引き続き、複数のトンネルの相互影響性を調べるものである。

2. 実験装置および模型材料 Fig.1に装置のシステム構成を示す[1]。実験装置は有効半径80cmのコンパクトなものであるが、サーボモータ駆動により0G～200Gの任意の重力場を再現する。また、地下深部の岩盤挙動の解析にも対応できるように、油圧による上載荷および空気圧による側圧载荷が可能である。さらに、装置内部のCCDカメラによる連続的な画像計測、および、パソコンの計測ボードによる加速度や変位など自動計測が可能である。

模型材料には、硫酸バリウムBaSO₄、酸化亜鉛ZnO₂、白色ワセリンを重量比70:21:9で混合したものを圧縮・成形したものを使用した[2]。本材料は、成型時の圧力により地盤強度を自由に設定でき、粉状に戻して、繰り返し利用できる。材料の物性値をTable.1に示す[3]。

Table.1 模型材料の物性値

密度 (g/cm ³)	1.6	1.9	2.0	2.1
一軸圧縮強度 (kPa)	90	150	180	210
粘着力 (kPa)	31	90	99	108
内部摩擦角 (degree)	25.0	32.8	39.2	45.6
ヤング率 (MPa)	24	49	60	71

3. 実験方法 材料を混合した後、数層に分けて型枠に充填し、油圧ジャッキにより圧縮・成型した。圧縮時の摩擦を低減し、不慮の材料破壊を防ぐために、型枠表面にはテフロン加工を施した。

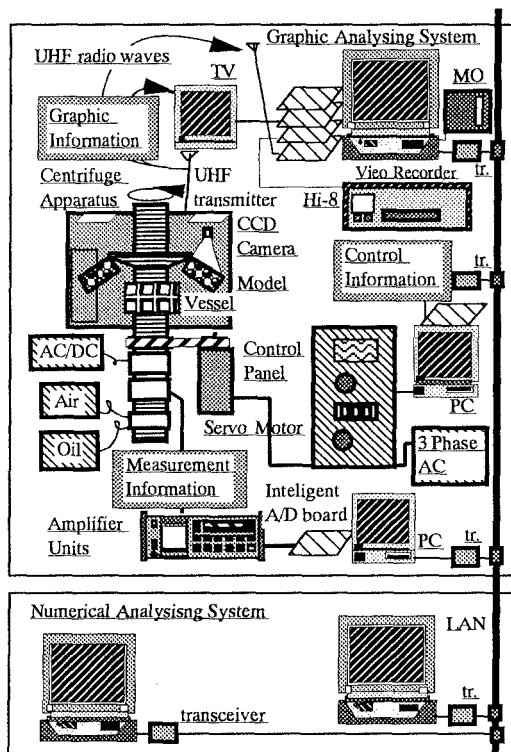


Fig.1 小型遠心载荷模型実験装置のシステム構成

掘削過程を逐次再現するには、小型の掘削ロボットを用いるのが有効であるが、今回は事前に空間を作成する方法とした。なお、材料が脆いので、空間の作成には若干の工夫がいる。そこで、模型表面をアクリル板で保護しながら、所定サイズのステンレスパイプを模型前面に押し当てて、パイプを少しずつ押し込みながら、その内側を大口径の低速回転電動ドリルで削った。模型作成後にコンテナごと実験装置の载荷ベッセルに挿入し、遠心力を加えてその挙動を調べた。

4. 計測精度についての検討 実験過程は、CCDカメラの画像情報を、UHF電波で装置内部より取り出し、小型の8mmビデオに記録・保存する。実験後に、画像をパソコンに取り込み、画像解析ソフトにて挙動を数値化する。なお、トンネル壁面の変形挙動は目視でも確認できるが、周辺地山の挙動は読み取りにくい。そのため、模型地山の前面に、直径6mmのプラスチック小球を半分にカットしたものを格子状の位置に埋め込んで、地山の挙動を読むためのターゲットとした。

模式図をFig. 2に示す。一般には計測用ターゲットのサイズは小さい方が読みとりが正確になると考えられるが、小さなターゲットの場合、計測可能な変位の最小値は、カメラの画素の大きさとなる。本装置のCCDカメラは水平768画素、垂直494画素であり、被写体の観測窓（幅240mm、高さ200mm）全幅を写すと、1画素が0.3mm程度に相当する。従来の方ではそれより小さい変位については正確に読みとれない。

一方、本実験で用いた小球は直径6mmで、画素約300個分に相当するが、画面情報を2値化して、ターゲットに属する約300個の画素の座標値の平均値を取ることで、画素の大きさより1桁小さい変位を正確に把握できるようになった。

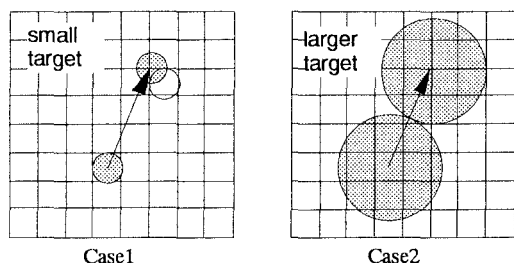


Fig.2 ターゲットの大小による計測精度の比較（概念図）
解説：格子は画素を表す。小さいターゲットでは計測可能な変位は画素のサイズとなる。Case1では、右に2画素、上に3画素の変位となる。大きなターゲットで、画素の平均値をとることにより、画素のサイズより小さい変位を計測できる。Case2では、右に1.5画素、上に3.5画素となる。

5. 汎用FEMソフトによる画像歪曲の修正

CCDカメラに一眼レフ広角レンズをとりつけて画像を撮影しているが、空気抵抗と装置の寸法制限のため、カメラと模型との距離を十分にとれず、そのため画像に歪みが発生する。この歪みは写真測量技術により理論的に除去可能であるが、そのためのシステムは高価である。そこで、本研究では、数値化に伴う画像歪みの影響を除くために汎用のFEMプログラムを活用した。詳細は文献[4]に譲るが、事前に模型ベッセル前面に、10mm間隔の格子を印刷した透明シートを取り付けて撮影し、格子を四角形有限要素と考え、各格子点の座標値を拘束条件として剛性マトリックスを作成する。模型実験の観測画像に、この剛性マトリックスを作用させることにより、変位を正確に補正可能となる。

6. 実験結果 実験結果の一例をFig.3に示す。これは、密度1.6g/cm³の模型地山に遠心加速度40G（モデル中心の測定値）を載荷したものである。結果では、はじめトンネルの天端付近に亀裂が発生し、さらに破壊が進行し、最終的には天端が崩落して土砂がトンネル内に溜まった。天端の破壊・崩落はトンネルの直上

約20mmのところまで及んだが、最終的には地表までは達せず、トンネル上方にアーチが形成され、崩壊はそれ以上進行しなかった。また、トンネル上部には沈下が生じ、トンネル直上の地表面で4.6mmの沈下となった。また、側方の地山には、トンネル内空に向かって変位が発生した。これらの結果を画像変換し、画像処理ソフトで数値化することにより、変形や破壊挙動に関する定量的な計測が可能である。

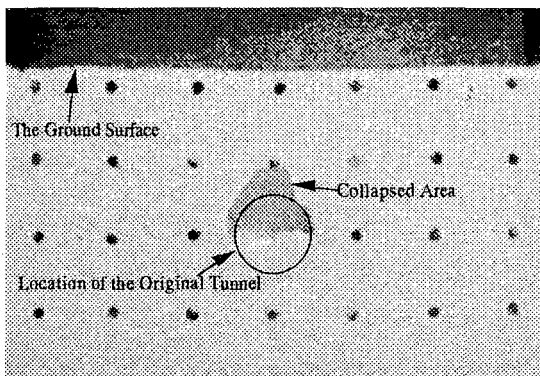


Fig.3 実験結果の一例（解説：幅278mm、高さ168mm、奥行き50mmの均質な矩形地盤に、土被り70mm、直径45mmの円形トンネルを設けたもの。天端部分が破壊し、トンネル内部に土砂が崩落した。トンネル上方地山には沈下が発生し、側方の地山はトンネル内空方向に変形した。）

7. まとめ トンネル周辺地山は多くの不確実性を有しており、しかも複雑な挙動を示すので、その具体的な挙動を調べるには模型実験が有効である。本報告では、人工の岩盤材料による簡単な遠心模型を用いて、地下空間を掘削した場合の周辺地山の挙動を模型実験的に調べるための実験場の工夫について述べた。今後、本トンネルを既設トンネルとして、新設トンネルを施工した場合の相互影響性について実験的に検討を行い、複数の地下空間の施工による影響評価に資するものである。

<参考文献>

1. A.Aikawa & T.Chishaki (1987) : A New Remote-Controllable Centrifuge Apparatus with the Capacity for Continuous Observation through a Local Area Network, China-Japan Joint Symposium on Recent Development of Theory & Practice in Geotechnolgy, pp.99-104.
2. T.Esaki, A.Aikawa, et.al. (1993) : Development of a new base friction technique and its application to geotechnical studies, Assessment and Prevention of Failure Phenomena in Rock Engineering, p.403-408.
3. 江崎哲郎, 他 (1991) : 深部に位置する不連続性岩盤の挙動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, pp.147-151.
4. 相川 明, 横山 蔵(1990) : 有限要素法を用いた地図のひずみの補正法について, Association of Precise Survey & Applied Technology, No.46, pp.48-54.