

(30) 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

九州大学工学部	正会員	江崎 哲郎
九州大学工学部大学院	学生会員	蔣 宇静
九州大学工学部大学院	学生会員	○三谷 泰浩
九州共立大学工学部	正会員	亀田 伸裕

An Experimental Study on the Behavior of Discontinuous Rock Masses at Depth

Tetsuro ESAKI, Yujing JIANG, Yasuhiro MITANI,
Faculty of Engineering, Kyushu Univ.
Nobuhiro KAMEDA, Faculty of Engineering,
Kyushu Kyoritsu Univ.

Abstract

The behavior of rock masses around the cavity is much influenced by discontinuities which are contained within them. The base friction technique is one of the most efficient tools for modeling the behavior of discontinuous rock masses located at relatively shallow depth.

This paper presents the development of the model materials which represent the discontinuous soft rocks for the scale model test. It also shows some tests results of homogeneous and discontinuous rock masses as the parameter of the depth of an opening. The experimental results are compared with the F.E.M. analysis. It has become clear the difference between the behaviors of homogeneous and discontinuous rock masses.

1. はじめに

地下空洞の周辺の地盤の挙動は、不連続面に支配されることが多い。このため、不連続性を考慮したモデルや限界平衡による解析法が開発され、実際の問題に適用されるようになってきている。これらの解析法は、連続体モデルも含めて、境界条件や材料特性のみならず対象となる現象をよりよく表現できるものを選択することが大切である。連続体解析が最も不適当な例として、不連続性岩盤中の浅いトンネルの安定問題がある。この問題は、層理面や空洞のまわりに二次的に発生した不連続面によって分断された個々のブロックが、重力が卓越した状態で進行性の破壊を生じるため、連続体解析では説明できない¹⁾。このような場合には、模型実験が、最も有効な手段となるであろう。

模型実験は、原型に類似した材料を採用して構造を模擬するため、原型の挙動を本質的に容易に表現できるのみならず、現象の視覚的把握や変形、破壊過程などに関連する種々の影響因子の相互関連の理解が容易であり、実際の挙動を推定するのに他の解析に見られない情報を与える。とりわけ、底面摩擦模型実験は、定性的な模型実験であるのみならず、空気圧を与えることにより相似則を満足する定量的実験となるので、この問題に対して極めて有効と考え、装置の開発を行ってきた²⁾。

本論文は、陥没を生じやすい浅い地下空間よりも、やや深部に位置する軟岩岩盤内の地下空間の安定性、およびその周辺の挙動について実験的検討を行った。まず、この実験に用いる不連続性を有する軟岩を想定した模型材料の検討を行った。底面摩擦模型実験を用いて、このような比較的深部の空洞の安定性およびその周辺岩盤の挙動を、不連続性が卓越する場合とそうでない場合について、破壊挙動の比較、空洞深度による相違を調べ、有限要素法による数値解析解との比較を行った。

2. 底面摩擦模型実験装置

底面摩擦模型実験は、二次元の地盤モデルを水平に置き、重力に相当する応力を模型底面の摩擦により作用させ、地盤内の変形や破壊の進行状況をシミュレートするものである。この方法は、安定した重力効果が得られ、模型の逐次的な破壊の進展の観察が容易にできること、比較的縮尺の小さな模型にもかかわらず、空気圧を段階的に変化させることで、力学的縮尺を制御することができるので、同一の模型材料を用いて、強度の異なる岩盤による実験ができるなどの特徴を有する。さらに筆者らの開発した装置は、比較的深部の状況を表現できる点、力学的縮尺に影響の大きい摩擦係数を変化させることができる点、従来の装置よりも平面ひずみ状態に対して満足する点で優れている³⁾。この装置の概略図を Fig.1 に示す。この装置上に幾何学的縮尺が 1/100~1/200 の模型 (500mm×500mm×25mm) を水平に置く。重力に相当する摩擦力は、模型底面のプレートが水平に定速で移動することで与えられる。摩擦プレートは異なる摩擦係数を有するプレートの使用が可能であり、広範囲の応力状態に対応できる。深部の応力状態を表現する場合には、垂直方向には、6 台のジャッキからなる外力載荷装置、水平方向には、柔らかな載荷面を持つ載荷装置を用いて、模型に均等な境界応力を加える。模型の挙動は、装置上方の移動台に吊下げたビデオカメラによって、ビデオフロッピーに分割画面として記録される。実験後、その画像データを画像解析装置⁴⁾を用いて数値およびグラフィックで処理する。

3. 模型材料

岩盤は、その性質に不連続性が支配的であるか否かによって、連続性岩盤と不連続性岩盤とに分類される。連続性岩盤は、その変形性や強度が、不連続面による影響よりも岩そのものの性質による影響が大きく、不連続性岩盤は、岩そのものの力学的特性にはあまり関与しない岩盤である。さらに、岩を硬岩と軟岩に分けると、一般に、硬岩からなる岩盤は不連続性岩盤として、軟岩は連続性岩盤として取り扱われることが多い。しかし、軟岩でも亀裂が卓越する場合は、不連続性岩盤として取り扱うべきであろう。軟岩の特徴としては、一軸圧縮強度が約 100kgf/cm² 以下で、弾性係数と一軸圧縮強度の比が、約 200 前後であり、硬岩の 500 程度より小さい⁵⁾。このような軟岩の特性を念頭に、連続性岩盤と不連続性岩盤の特徴を表現する模型材料の検討を行った。

3. 1 連続性岩盤模型材料

連続性岩盤の模型材料として、Karlsruhe 大学で開発された硫酸バリウム、酸化亜鉛、ワセリンを重量比で 70 : 21 : 9 で配合した混合試料を採用する。この試料は、押し固めることで容易に模型を作製できる。実験では、この試料を装置上に置き、所定の空気圧で押し固めて模型を作製する。Table.1 に示すように、この均質模型材料の力学的性質は、締固め度、つまり単位体積重量に大きく依存している。単位体積重量を目安にして、弱い岩盤

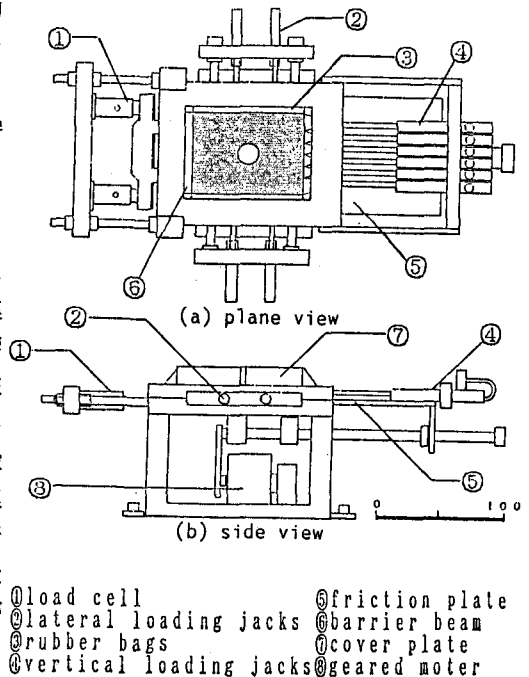


Fig.1 The Base Friction Apparatus.

Table.1 Mechanical Properties for Different Specific Weight of Model Material.

γ (kg/cm ³)	1.6	1.9	2.0	2.1
σ_c (kg/cm ²)	0.92	1.53	1.84	2.14
c (kg/cm ²)	0.32	0.92	1.01	1.10
ϕ (°)	25.0	32.8	39.2	45.6
E (kg/cm ²)	250	500	610	720
E/σ_c (-)	271	326	331	336

からある程度強固な岩盤を想定することが可能である。

3. 2 不連続性岩盤模型材料

不連続面を明確に定義できる試料として石膏を主体とした混合材料の検討を行った。配合の条件として、第1に、材料の混合が容易であり、型枠に詰め込み易く、材料の分離が少ないこと、また、仕上がりがよいこと、第2に、軟岩としての特徴をよく表現できること。底面摩擦模型実験における力学的縮尺が $1/2 \sim 1/20$ であることから、模型が $10 \sim 20 \text{ kgf/cm}^2$ 程度の強度を有し、弾性係数と一軸圧縮強度の比 E/σ_c が200前後であること、第3に、強度が経時的に変化しないことが挙げられる。石膏は、配合量により数十 kgf/cm^2 程度の強度となる。しかし、水と反応して急激な凝結・硬化反応を示す。そのため、遅延剤として、リグニンスルホン酸ナトリウムを、重量比で石膏の0.5%添加することにより凝結時間を調節した。今回行った配合試験の結果を Table.2 に示す。この試料を $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ の円柱の型枠に詰め、乾燥収縮防止のため、 25°C で一昼夜乾燥後、強度を発現を防止するため 80°C で3日間炉乾燥して作製し、三軸試験を行った。石膏と水のみの配合では強度が過大となり、取り扱いも困難となるため、石灰を加えて強度の低下を図った。その結果、石膏：石灰が1:3~1:5の試料に関して、強度的には十分なものが得られた。しかし、石灰は、強度の低減には役立つものの、材料の弾性係数を増加させる。そこで、石膏、石灰の混合試料に標準砂を加え、弾性係数の低下を図った。まず、石膏、石灰の重量に対して分離を生じにくい適切な砂の量を検討した結果、石膏+石灰：標準砂が2:5~1:3が最も適当であった。従って、石膏：石灰：砂が1:3:12の配合に決定した。この試料の応力-ひずみ曲線を Fig.2 に、モールの応力円図を Fig.3 に示す。その結果、側圧 σ_3 が $5 \sim 10 \text{ kgf/cm}^2$ の範囲でひずみ軟化・硬化現象を示す材料であること、残留強度とピーク強度との差が小さいこと、強度、弾性係数が適当な値で実験の範囲に対応できることなど目的とする軟岩の特性をよく示す模型材料を得ることができた。

4. 模型実験および結果の考察

4. 1 連続性岩盤中の空洞周辺の挙動

連続性岩盤を仮定して、深度の違いによる空洞周辺の挙動の変化を調べることを目的として実験を行い、実験結果と F.E.M. 解析との比較を行った。使用した模型は、前述の連続性岩盤模型試料を 200 kPa の空気圧で押し固め

Table.2 Mix Proportions of Discontinuous Model Materials and Their Properties.

配合比	強度 σ_c (kg/cm^2)	弾性係数 E (kg/cm^2)	E/σ_c (-)
石膏：石灰：砂			
2 : 3 : 0	24.0	6240	260
1 : 3 : 0	13.0	3055	235
1 : 4 : 0	14.8	3522	238
1 : 5 : 0	15.3	4636	303
1 : 6 : 0	11.2	3114	278
1 : 1 : 2	59.3	12354	208
1 : 1 : 3	34.4	8139	237
1 : 1 : 4	19.4	5359	276
1 : 1 : 5	14.6	4289	294
1 : 1 : 6	15.3	4864	317
2 : 4 : 15	21.6	5681	263
1 : 2 : 9	10.7	2718	254
1 : 3 : 10	16.0	4000	250
1 : 3 : 12	14.9	2365	217
2 : 8 : 25	11.9	2856	240
1 : 4 : 15	6.4	1510	236

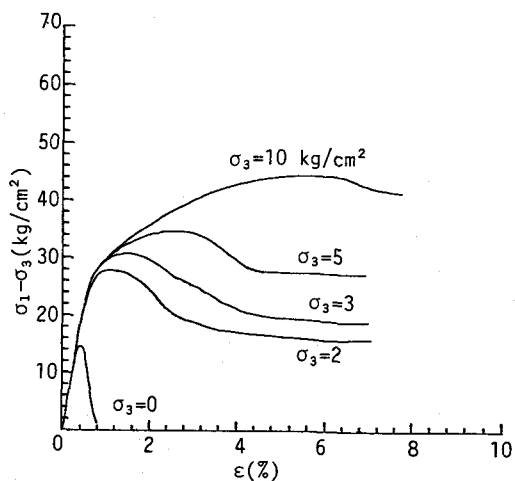


Fig.2 Stress-Strain Curves of Model Material.

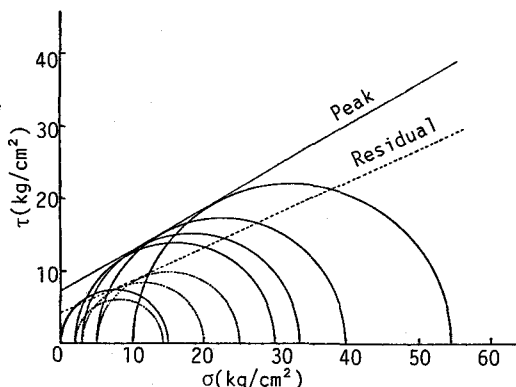


Fig.3 Mohr Circles of Model Materials.

たものを使用する。模型は、原地盤中で、幅10m、高さ4mの矩形空洞が深度50mと100mの位置に存在する場合とした。そのため、幾何学的縮尺を1/100とし、空洞は模型内で幅10cm、高さ4cmの大きさで表した。模型内に作用する応力の縮尺は、模型表面に作用させる空気圧とプレートの摩擦係数により決定される。実験では、模型表面に空気圧40kPaを作用させ、摩擦係数0.1のプレートを使用した。この場合、力学的縮尺は1/15.6、模型の一軸圧縮強度が1.84kgf/cm²なので、一軸圧縮強度が28.7kgf/cm²の原型の岩盤を想定している。Fig.4に深度50mの位置、Fig.5に深度100mの位置に空洞を開削した場合の地盤の破壊状況を示す。どちらも亀裂は、空洞左右上端から発生し、アーチ状の破壊線を示した。空洞深度50mの場合、空洞底部では、盤膨れが確認されるものの、明確な破壊までには至らなかった。しかし、100mの場合には、下盤の盤膨れが激しく、空洞下盤の左右端からも亀裂が発生し、空洞上部と同様なアーチ状の破壊線形成する。また、空洞の側壁も押しだしの現象を呈する。100mの場合、空洞点盤中央で955mmの沈下、空洞下盤中央で65.4mmの盤膨れを生じた。

4. 2 画像解析と数値解析との比較

空洞深度100mの場合について、F.E.M.解析との比較を行った。実験で得られた標点の変位を用いて、模型内に発生したひずみ、応力を求めた。その結果の一部として、せん断ひずみのコンター図をFig.6に、また、F.E.M.解析による塑性ひずみのコンターと破壊領域の図をFig.7に示す。F.E.M.解析では、4節点要素を用い弾塑性解析を行った。その結果、かなり類似した結果であるが、ひずみ分布状況の形状は一致しない。これは、数値解析が連続体解析であるため、亀裂発生後の状況を示すことが困難であることも一因であると考えられる。

4. 3 不連続性岩盤中の空洞周辺の挙動

不連続性岩盤に対して、連続性岩盤と同様の実験を行った。前述の不連続性模型材料を500mm×20mm×25mmの細長い角柱を作製し、それを並べて不連続面(層理面)を有する岩盤、すなわち、間隔が2mの水平な層理面のモデルを作製した。模型は、この岩盤中に幅12m、高さ4mの矩形空洞を開削した場合を想定した。幾何学的縮尺は1/100とし、空気圧100kPa、摩擦係数0.2の摩擦プレートを使用した。模型の力学的縮尺は1/2.5であるため、原型の一軸圧縮強度は37.3kgf/cm²となる。Fig.8に空洞深度50mの場合の空洞の破壊状況を示す。まず、空洞天

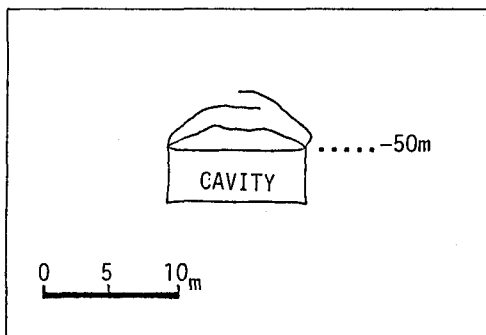


Fig.4 Homogeneous, Depth=50m.

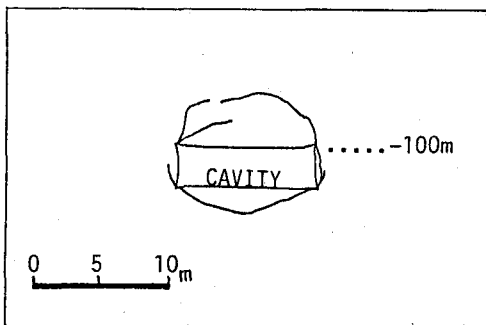


Fig.5 Homogeneous, Depth=100m.

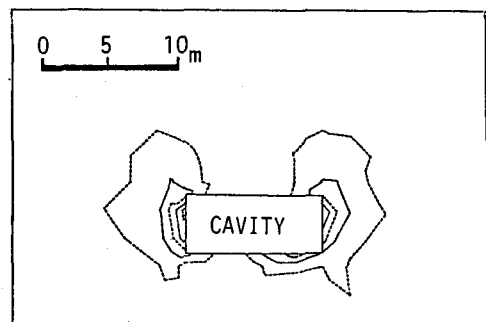


Fig.6 Contours of Maximum Shear Strains by Experiment.

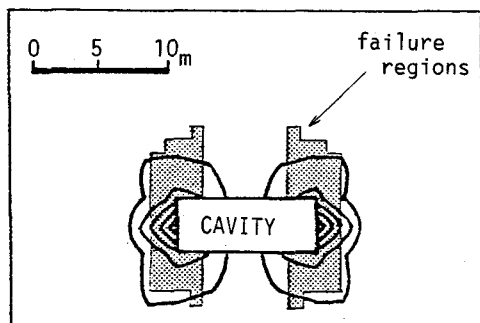


Fig.7 Contours of Plastic Strains and Failure Regions by F.E.M.

盤では、空洞隔上方の両端と空洞中央部に亀裂がはいり、層が分離する。その後、次々と同様の亀裂が上層に進展する。しかし、上層になるほど亀裂で分離される層のスペンは短くなり、破壊の進展は、最終的には台形状の破壊領域を形成して終息する。さらに、空洞下盤でも亀裂の発生が確認される。しかし、天盤部分ほど破壊は進展しない。Fig.9に空洞深度15mの場合の浅い空洞の破壊状況を示す。空洞深度50mの場合と同様に破壊が最初に空洞天盤に発生し、亀裂は上層へ進展する。しかし亀裂は、空洞とほぼ同じ幅で上部に進展し、地表面に達する。Fig.10に空洞深度100mの場合の空洞の破壊状況を示す。この場合も空洞深度50mの場合と同様の破壊の状況が、空洞上部にみられる。しかし、最終的な破壊領域は、空洞深度50mの場合に比べて大きくなる。また、空洞下盤部では、下盤中央にも亀裂が入り、空洞天盤部の破壊と同様の破壊状況を示す。深度の異なる3つの場合について空洞の崩落高さを比較すると、空洞深度が100mの場合には15.2m、空洞深度が50mの場合には10.0mの崩落高さを示し、深度が大きくなるにつれて破壊領域が大きくなる。しかし、地表面及び側圧の影響を程度によって破壊状況が異なる。

5. おわりに

連続性および不連続性を仮定した岩盤中の比較的深部の空洞周辺の挙動について、底面摩擦模型実験を用いて、その破壊モードを確認し、空洞深度の相違による破壊状況の違いを明らかにした。この結果、両者の挙動は非常に異なる破壊のモード、進展状況を示した。また、亀裂の発生と塑性領域は必ずしも一致しないこと、不連続性岩盤内の空洞の周辺は、亀裂の進展により初期の状況と異なった二次的状況に至り、次の破壊へ進展することを考えねばならない。今後、不連続性岩盤の挙動特性についてさらに研究を進めていく予定である。

参考文献

- 1) Ward, W.H : Geotechnics, Vol.28, pp.70-133, 1978
- 2) 江崎 哲郎 : 九州大学生産研報告, 第80号, pp.89-100, 1986
- 3) 江崎 哲郎他 : 第22回岩盤力学シンポジウム講演論文集, pp.186-190, 1990
- 4) 江崎 哲郎他 : 第21回岩盤力学シンポジウム論文講演集, pp.246-250, 1989
- 5) Deere, D.U. : Rock Mechanics in Engineering Practice, eds. K.G.Stagg and O.C.Zienkiewicz, Wiley, London, pp.1-20, 1968

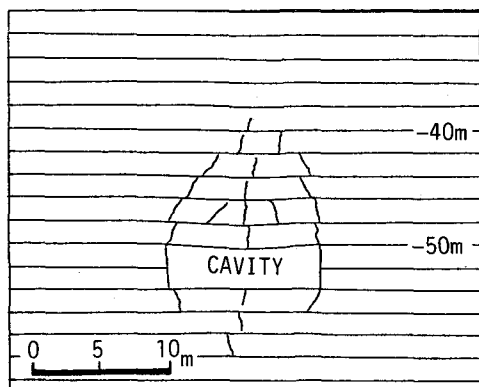


Fig.8 Discontinuous, Depth=50m.

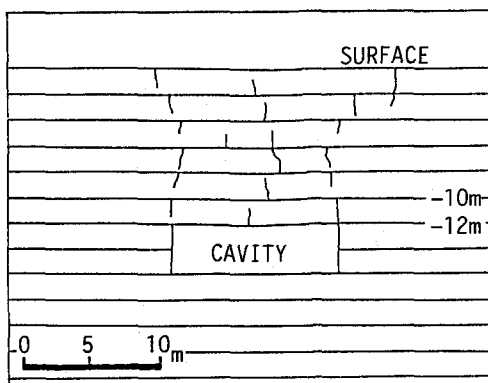


Fig.9 Discontinuous, Depth=12m.

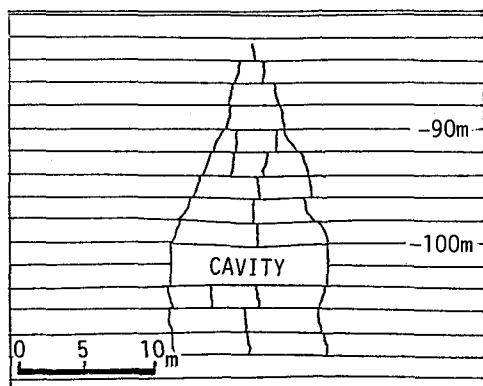


Fig.10 Discontinuous, Depth=100m.