

(57) 地下空洞を持つ地盤のシミュレーション のための底面摩擦模型装置

九州大学生産科学研究所

西田 正

正員 江崎 哲郎

○ 正員 亀田 伸裕

九州大学工学部

書川 佳巳

1. はじめに

底面摩擦模型装置はトンネル、地下発電所あるいは鉱山における坑道、採掘跡など、地下空洞を持つ地盤の重力下における変形、破壊挙動を観察する手段として有効な手法である。筆者らが試作した底面摩擦模型装置は、試料上面に空気圧を作用させ、剛性の高い底板を非常にゆっくりとした速度で動かして摩擦力を発生させることができる特徴を持っている。本報告では、本装置を用い鉱山における地表陥没現象を対象に、均質地盤、不連続地盤あるいは強度特性を変化させた地盤について、空洞周囲の破壊挙動のみならず、地盤内の変形、ひずみ挙動について検討した結果について述べる。

2. 底面摩擦法の原理および相似則

底面摩擦模型装置で空気圧が作用する時のモデル内の応力状態は図・1のようになり、これから、モデルにかかる垂直応力 P_{tot} 、モデルとプレートとの間の摩擦力 τ は

$$P_{tot} = \gamma' \cdot e' + P_{air} \approx P_{air} \quad (1)$$

$$\tau = \mu \cdot P_{tot} \approx \mu \cdot P_{air} \quad (2)$$

となる。ここで、 γ' はモデルの単位体積重量、 e' はモデルの厚さ、 P_{air} はモデル上面にかかる空気圧、 μ はモデルとプレートとの間の摩擦係数である。ゆえに、地表から任意の深さ z' におけるモデル内のプレートに平行な応力 $\sigma_{z'}$ は

$$\sigma_{z'} = \frac{\tau \cdot z'}{e'} \approx \frac{\mu \cdot P_{air} \cdot z'}{e'} \quad (3)$$

となる。(3)式において $\gamma' = 2.0 \text{ g/cm}^3$ 、 $e' = 2.5 \text{ cm}$ 、 $z' = 50 \text{ cm}$ 、 $\mu = 0.685$ 、 $P_{air} = 0.2 \text{ kg/cm}^2$ の場合のモデル内の応力は、空気圧がかからない従来の装置の応力の約40倍になることが分かる。

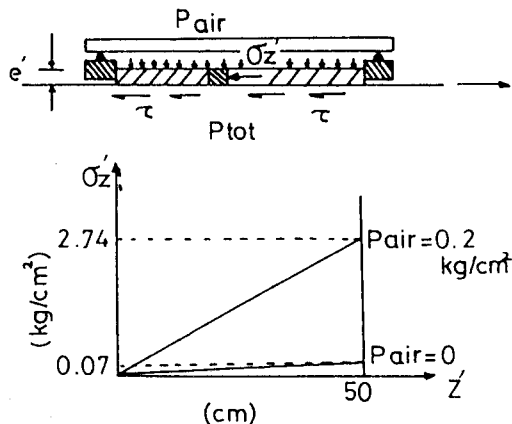
次に底面摩擦における相似則を考えると、次のようなスケールファクターを導入する。

$$\Sigma = \frac{\text{原型の強度}(\sigma_z)}{\text{モデルの強度}(\sigma_{z'})} \quad (4) \quad \Lambda = \frac{\text{原型の長さ}(z)}{\text{モデルの長さ}(z')} \quad (5)$$

ここで、 Σ は応力スケール、 Λ は幾何スケールである。そこで、空気圧が作用するときの応力スケール Σ を考えると(3)、(4)、(5)式より

$$\Sigma = \frac{\sigma_z}{\sigma_{z'}} = \frac{\gamma \cdot z}{\frac{\mu \cdot P_{air} \cdot z'}{e'}} = \frac{e' \cdot \gamma \cdot \Lambda}{\mu \cdot P_{air}} \quad (6)$$

となり、空気圧の変化がそのまま応力スケールの変化となって、種々の強度を持つ地盤の変形、破壊挙動をシミュレートすることができる。ここで、 γ は原地盤の単位体積重量である。



図・1 モデル内の応力状態

3. 底面摩擦模型装置および材料

3.1 底面摩擦模型装置

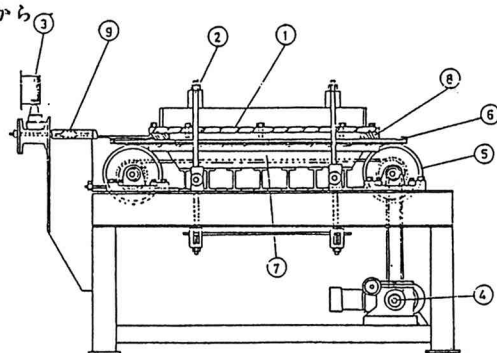
底面摩擦模型装置の概要を図・2に示す。装置の詳細については、すでに発表済み¹⁾であり、ここでは省略するが、モデルは最大80×50×2.5 cm(縦×横×厚さ)までの実験が可能で、地表からの上載荷重が表現できるようになっている。本装置の特徴は、Egger²⁾の装置のエンドレスのベルトの代わりに、ウレタンゴムを張り付けた剛性の大きな金属製のプレート⑥をゆっくり移動させることによって(10mm/min)摩擦力を発生させることである。モデルは鋼鉄製のフレーム⑧内にセット後、モデル上面を薄いビニールシートで覆い、アクリル板と強化ガラスでできた上ぶた①との間に空気圧を送って、摩擦力を発生させる。この時、モデルにかかる空気圧Pairは(6)式から

$$Pair = \frac{e' \cdot \gamma \cdot \Lambda}{\mu \cdot \Sigma} \quad (7)$$

となる。モデルとプレートの間の摩擦力はフレームに取り付けられた2個の力計⑨によって読み取り、また、モデルの地盤内の変位は、モデル表面の測点を装置上面に取り付けた写真機で撮影し、そのネガを読み取り顕微鏡(読み取り精度は1/1000mm)で読み取り後、コンピュータ処理する。

3.2 モデル材料

モデル材料は硫酸バリウム、酸化亜鉛、白色ワセリンを重量比で70:21:9の割合で混合した粉末試料を、試料整形器で締め固めたものを使用した。今回、用いた材料は単位体積重量 $\gamma' = 2.24 \text{ g/cm}^3$ 、一軸圧縮強度 $\sigma' = 2.28 \text{ kg/cm}^2$ 、弾性係数 $E = 377 \text{ kg/cm}^2$ 、粘着力 $C = 0.52 \text{ kg/cm}^2$ 、内部摩擦角 $\phi = 37^\circ$ の力学的特性を持ったものである。

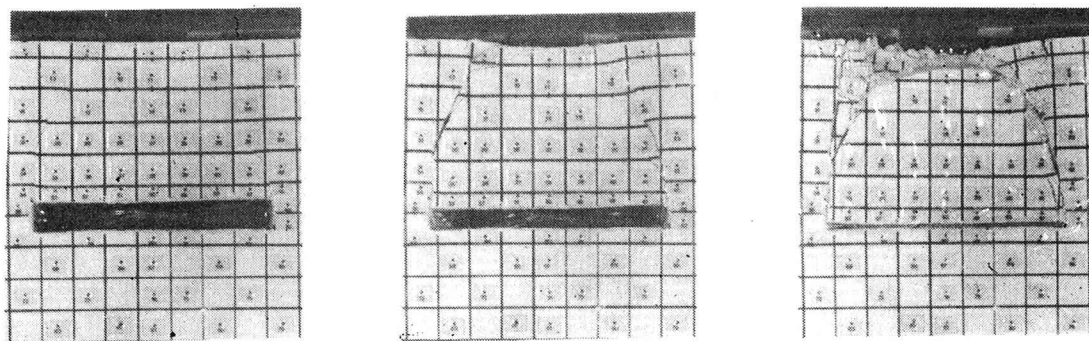


(1) 上ぶた (2) 固定用支柱 (3) 圧力計 (4) 動力源 (5) ギア (6) プレート
(7) テーブル (8) フレーム (9) 力計

図・2 底面摩擦模型装置

地表陥没現象に関する実験

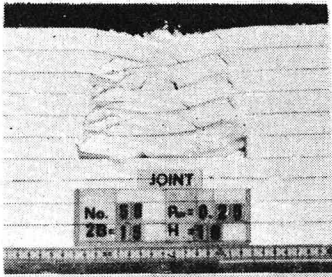
図・3は均質地盤中に開削された矩形空洞幅15cm、空洞高さ2cm、空洞深度10cm、 $Pair = 0.46 \text{ kg/cm}^2$ の時、すなわち幾何スケール $\Lambda = 100$ であるから、原地盤の大きさは1cmを1mとした時の天盤の逐次破壊状況を示している。これより、クラックはまず空洞天盤隅に発生し、そのクラックが次第に発達してアーチ型の崩落面を形成し、深度が浅いと崩落面が地表に達して地表が陥没を生じることが分かる。このように地表陥没の逐次破壊現象がゆっくりした速度で、しかも容易に再現できる。また、従来の落し戸装置では見られなかった下盤の盤膨れ現象も顕著にみられる。



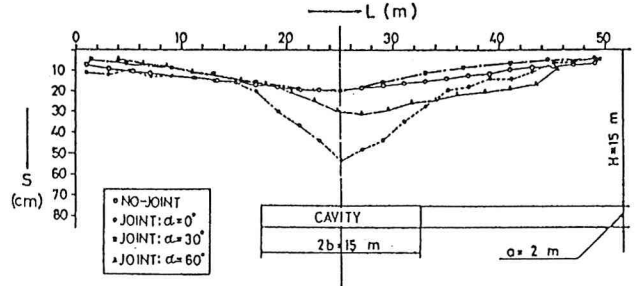
図・3 底面摩擦装置による地表陥没現象

不連続面を持つ地盤の沈下の実験

図・4は空洞幅15cm、空洞深度10cm、空気圧0.25kg/cm²、不連続面が空洞と平行($\alpha=0^\circ$)に入っている場合の破壊状況を示している。この場合、クラックはまず空洞天盤隅に発生し、その後、次第に上層へ移行していくが、天盤がたわむに従い、地表近くでは引張り破壊によるクラックが中央部付近に発生し、最後は地表部が折れ曲がる形で崩落することが分かる。図・5は不連続面が傾斜して空洞天盤となす角 α が 0° 、 30° 、 60° の場合の地盤と均質地盤の場合の地表の沈下量を原地盤の長さで示したものである。この場合、最大沈下量はいずれも空洞中央部付近で見られ、不連続面が空洞に平行な場合が最も沈下量が多いことが分かる。



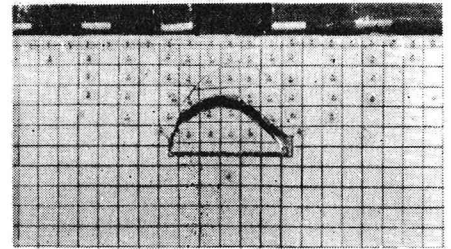
図・4 不連続面がある時の破壊状況



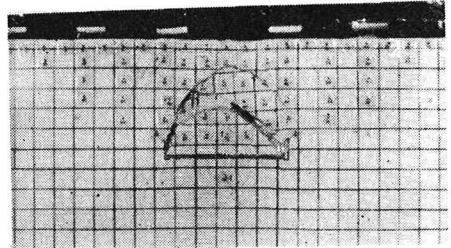
図・5 地表の沈下曲線

地盤の強度特性を変えた実験

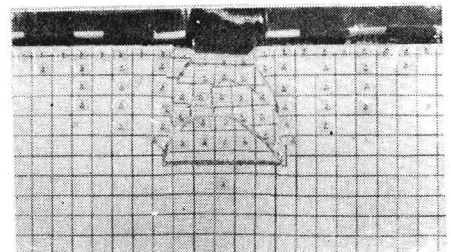
本装置のもう一つの特徴は、同一試料で強度の異なる実験ができることである。すなわち、(6)式において、空気圧 P_{air} を変えると応力スケールも変わり、原地盤の強度が変わることになる。一例として原地盤で空洞深度10m、空洞幅10m、載荷幅8m、上載荷重10t/m²を想定し、空気圧を0.25から0.40kg/cm²まで変化させた時の破壊状況を図・6に示す。 $P_{air}=0.25$ kg/cm²($\Sigma=3.00$)では、天盤の崩落高さは約7mで陥没は生じず、また地表の沈下も殆ど見られない。しかし、空気圧が増加するにつれて、すなわち強度が低下するにつれてアーチ型の崩落面が次第に上部へ進行し、 $P_{air}=0.40$ kg/cm²($\Sigma=1.87$)になると、崩落面と地表の載荷板端から発生したクラックがつながって、陥没を生じることになる。この時の地盤強度は最初の強度の約60%に低下したことになる。また、図・7は地盤の強度低下に伴う地表の沈下曲線を示しており、空気圧が0.25kg/cm²の時の最大沈下量は空洞中央部で約12cmで、空気圧の増加と共に沈下量も大きくなり、陥没を生じる前($P_{air}=0.36$ kg/cm²)の沈下量は約30cmとなる。この現象は例えば地盤の風化による強度低下を表現したモデル実験を行なったことになり、従来再現出来なかった実験が可能となった。



(a) $P_{air}=0.25$ kg/cm²の場合



(b) $P_{air}=0.36$ kg/cm²の場合



(c) $P_{air}=0.40$ kg/cm²の場合

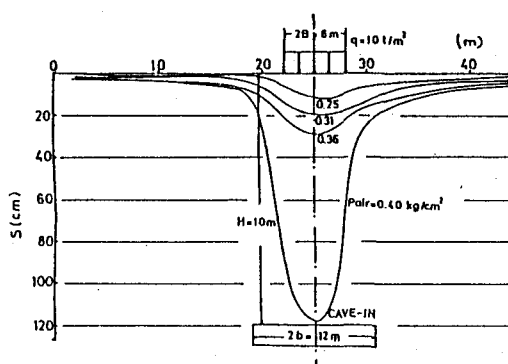
図・6 地盤強度の変化による破壊状況

地下構造物に対する地盤内部の歪みに関する実験

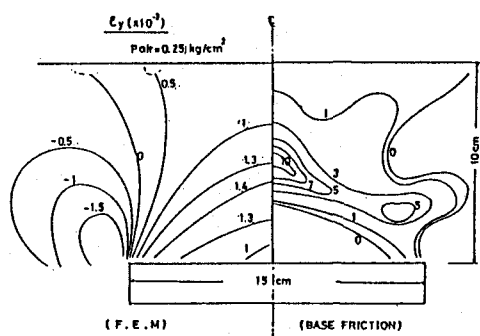
トンネルあるいは採掘に伴う地盤内部の構造物の設計、安全性を検討する場合、地盤内部の応力あるいは歪みを求めることが必要である。最近、構造物の施工中に現場計測を行ない、得られたデータをフィードバックさせることにより、地山の挙動を正確にとらえ、安全で経済的な構造物を施工する方法が試みられている。

筆者らは、底面摩擦模型装置によるモデル実験から現場の歪みあるいは応力の挙動が推定できないか検討中であり、その一部を紹介する。

図・8は底面摩擦模型装置においてクラックが入る前の状態(全荷重の約80%がかかった状態)から求めた鉛直歪みと、有限要素法から求めた鉛直歪み ϵ_y の分布を示している。ここに、歪みは鉛直方向の移動差を距離で割ったものである。有限要素法によれば、空洞天盤上部には引張り歪みのみが働き、空洞端より外部で圧縮歪みが働くことが分かる。一方、底面摩擦模型装置から求めた歪みは、理論解析と同様に空洞天盤上部に引張り歪みがみられるが、空洞中央部および空洞隅上に大きな引張り歪み領域が現われている。その後、これらの部分からクラックが入ったことを考えると、この部分が既に塑性域に近い状態になっていると思われ、実際の破壊、歪み挙動に近い状態であると推定される。従って、本装置から、現場試験を行なう前にトンネル周辺の破壊、歪み挙動が把握できると期待され、今後、さらにこの点について検討を行なっていきたい。



図・7 地盤強度の変化に伴う地表沈下曲線



図・8 地盤内部の鉛直歪み分布

4. まとめ

今回、試作した底面摩擦模型装置を用いた実験は、地盤内の変形、破壊挙動が容易に、しかも逐次観察できる利点がある。また相似則を考慮できるので、モデル実験から地盤の強度、空洞深度および幅あるいは上載荷重が分かれば、地下空洞に対する安全性を簡単に検討することができる。また、従来できなかった同一試料で、実験途中に強度特性を変える実験(例えば風化現象)が可能である。さらに、有限要素法では解析困難な不連続な地盤に対しても、有効な手段となることが判明した。さらに、地盤内の構造物の設計、安全性を検討する場合は、現場試験前にモデル実験から地盤内の歪みあるいは応力分布が求められるので、これらの値から有限要素法を用いた逆解析法が可能と考えられる。これらについては、さらに今後の研究課題としたい。

参考文献

- 1) 西田正他。重力モデル実験のための底面摩擦装置の試作、開発。九州大学生産科学研究所報告, 第74号, 17-24(1983)。
- 2) Egger, P. A new development in the base friction technique, ISMES, Bergamo, 67-81(1979)
- 3) 西田正他。不連続岩盤の破壊挙動に関する底面摩擦装置によるモデル実験, 九州大学生産科学研究所報告, 第75号, 1-10(1983)。
- 4) 亀田伸裕他。浅所陥没の発生機構に関する研究(第4報)-底面摩擦法によるモデル解析- 日本鉱業会誌, 99巻, 1145号, 27-32(1983)。

(57) The Base Friction Model Apparatus for the Simulation of the Ground with Cavity

Tadashi NISHIDA*
Tetsuro ESAKI*
Nobuhiro KAMEDA*
Yoshimi KAKIGAWA**

The base friction principle permits the replacement of gravity in the plane of a two dimensional physical model by drag forces acting along its base. In Egger's base friction apparatus, we have a trouble of stretching of endless belt in case of very large base friction forces.

The authors have improved a new base friction apparatus which has the very high stiff plate with uretan instead of the endless belt and its plate can move with very slow speed (10mm/min). So we can easily observe the behavior of ground deformation and failure.

This paper describes some experimental studies on the mechanism of cave-in by this apparatus.

The conclusions are summarized as follows:

- 1) By this technique, the progressive development of a settlement crack or roof collapse can be arrested and examined at any stage.
- 2) The behavior of failure of the model is simulated to the ground with cavity in gravity field when proper air pressure on the model is supplied and geometric scale and the scale factor for stresses is satisfied. So, we can predict the behavior of the ground including collapse by this procedure.

*Research Institute of Industrial Science, Kyushu University

**Faculty of Engineering, Kyushu University