大深度に対応できる底面摩擦模型実験装置の開発*

——新しい底面摩擦模型実験装置の開発とその応用(第1報)——

江崎 哲郎¹ 亀田 伸裕² 蔣 宇 静³
相川 明⁴ 三谷 泰浩⁵

Development of the Base Friction Model Testing Apparatus for Underground Utilization at a Depth

—— Development and application of a new base friction model testing apparatus (1st Report) ——

by Tetsuro ESAKI¹, Nobuhiro KAMEDA², Yujing JIANG¹, Akira AIKAWA¹ and Yasuhiro MITANI³

1. Faculty of Engineering, Kyushu University, Higashi-ku, Fukuoka 092
2. Faculty of Engineering, Kyushu Kyoritsu University
3. Shimizu Construction Corporation

The base friction technique is one of the effective and quantitative experimental methods to predict the behavior of rock structures under gravity field. Many kinds of original base friction apparatuses have been developed and effectively used for studying stability of roof and settlement of ground surface due to shallow underground excavation.

This study describes a trial production of the new base friction apparatus for underground utilization at a depth, though current base friction apparatuses have been limited for fitting within shallow depth. In the newly developed base friction apparatus, friction force on the plate and external forces by jacks and rubber bags in vertical and horizontal directions, respectively, are simultaneously applied to produce a high stress field. Air pressure working on the model surface can be increased up to 600 kPa. Urethane or teflon base can be selected as frictional plate according to the purpose of tests.

It is concluded, by some illustrative experiments, that this development of the new base friction apparatus enables quantitative research on stability of opening in the deep underground.

KEY WORDS: Base Friction Apparatus, Underground Utilization, Behavior of Rock, Quantitative Scale Model

1. 緒 言

最近、大深度地下空間利用に代表される地下空間の有効利用が注目されている。深部の地下開発を行う上での問題点は、深部での開発経験が少なく、空洞設計に必要な空洞周辺の地盤の挙動、空洞支保のメカニズムなど未知の部分が多いことである。地下開発の需要が多くなれば、良好な岩盤の位置のみを選択できなくなり、ぜい弱な地盤での立地も余儀なくされるため、より厳しい条件での開発が多くなるであろう。このような深部地下地盤に、あ

る広がりや錯雑をもつ空間群を掘削、建設するにあたっては、従来の地盤の挙動を予測する方法では様々な制約が生じてくる。したがって、深部地盤の挙動を容易にかつ正確に把握するための新しい手法を開発する必要がある。

地盤の挙動を適切に評価する一般的な手段として、数値解析や模型実験が挙げられる。しかしながら、F. E. M. などによる数値解析を用いるには、境界条件、入力データの選択に十分な検討が必要であること、あくまでも連続体解析であるので、不連続面が卓越する地盤の解析には限界があることなど、いくつかの問題点が挙げられる。一方、模型実験は、不連続な地盤の状況を比較的忠実に表現しやすいこと、そして実際に視覚によって模型の変形や破壊の進展現象を理解できるといった点で非常に説得力があり効果的な手法であると考えられる。

本論では、このような模型実験手法の開発を目的として、新しく開発した底面摩擦模型装置について説明するとともにその原理と特徴を述べる。新しい底面摩擦模型装置は、大深度の地下空洞

* 1992年9月14日受付 3月2日受理 資源・素材学会平成3年度春季大会において一部発表

1. 正会員 工博 九州大学教授 工学部環境システム工学研究センター
2. 正会員 工博 九州共立大学教授 工学部開発学科
3. 正会員 工博 九州大学講師 工学部環境システム工学研究センター
4. 九州大学助手 工学部環境システム工学研究センター
5. 清水建設(株)原子力本部

キーワード: 底面摩擦装置, 地下利用, 岩盤挙動, 定量的模型実験

Fig. 1 Base friction modeling and bound condition.

問題にも対応でき、厳密な相似則に基づいた幾何スケール、応力スケールを導入することによって、実験的に現地盤を忠実にシミュレートすることを目指している。また、この模型装置を用いた実験例により、その適用性を評価した。

2. 底面摩擦模型装置の発展とその問題点

2・1 底面摩擦模型装置の開発の経緯

底面摩擦模型装置の嚆矢となったのは、Brayによる装置と言われる¹⁾。それは、平面上に不連続性岩盤を模擬したブロック状の模型試料を置き、その試料を摩擦の大きな面上で平面に平行に押すことにより摩擦力を発生させ、重力場を表現する方法であった。次いで、Hoek²⁾は、模型ブロックを固定して、その下のフィルムをひくことで、同じ効果を得ることに成功した。Goodman³⁾はサンドペーパーを底面とした装置を開発し、容易にクラックを作製できるぜい性試料を使用し、斜面の安定性に関する問題と地質要因との相互作用を説明した。その後、Bieniawski⁴⁾、Whyte⁵⁾、Shimada⁶⁾によって類似のものが製作された。これらの底面摩擦模型装置は固定フレーム内に置かれた模型材料の自重のみがベルトに加わり、ベルトを移動させて摩擦力を発生させるものである。しかし、これでは発生する摩擦力の大きさに限度があり、強度の弱い模型材料や不連続面のある模型の定性的な運動を表現できるとどまっている。その後、EggerとGindroz⁷⁾⁸⁾が、モデル表面に均一な空気圧を作用させる方法を開発し、ベルトに加わる垂直荷重を空気圧で調整することで摩擦力を制御し、相似則を満足する定量的な装置を考案した。さらに、Baumgartnerら⁹⁾やTeme¹⁰⁾が、実験台を傾斜できるように設計し、実験台の傾斜を変化させることにより重力を増大させて、深部空洞の安定機構などを調べた。その結果、これまでの適用範囲を超えた実験が可能となり、底面摩擦模型実験は、定性的であった実験から、様々な場合に対応できる定量的な実験となった。

国内では、Eggerの装置を参考として、名古屋大学および九州大学において初めて試作され、浅いトンネル、地下空洞の陥没機構の解明の研究に使用された¹¹⁾¹²⁾。その後、著者らは回転ベルトの代りにウレタンゴムを摩擦面とした剛性の高い鋼板を使用し、移動速度を非常に小さくすることによって安定した実験が行える

ように改良した。また、側方の境界条件を明確にし、垂直応力より大きい水平応力が加えられる側方載荷ができるようにした¹³⁾。

2・2 従来装置の改良点

底面摩擦模型装置は実用的な寸法、模型作製の精度から考えると地表から浅い位置にある空洞を対象とするのに適当である。すなわち、対象とする空洞が深くなるにつれその能力に限界があり、次のような問題点を生じる。

(1) 地表面の境界条件が必要であり、実用的なテーブルの大きさを考えると、地下約20～30m程度に存在する空洞を表現するのが限界である。

(2) 底面の摩擦が実際の力計に表れる値と異なる。これは、空気圧による上蓋の浮き上がりを防止するために、取り付けられているローラの摩擦抵抗が大きく、それをも含めた値になっているためである。また、フレームの剛性が小さく、空気圧、すなわち摩擦力が大きい場合には、枠が過大な変形を生じる。

(3) 剛性の高いプレートの場合でも、模型表面に加える空気圧が大きい場合には、ベルト、接続金具の耐力、モータの能力に限界がある。

(4) 水平方向の載荷に剛な載荷板を用いるため、大きな変形には追従できず、模型の製作精度が悪い場合には、均等な分布の負荷が難しい。

そこで、従来の装置を改良、発展させ、深部地盤内の空洞の挙動の解析が可能な新しい装置の開発を行った。

3. 新しい底面摩擦模型実験の原理

模型実験で最も基本となるのは、地盤内の応力状態である。新装置では、Fig. 1(a)に示すように、対象となる岩盤を空洞周辺の任意領域に絞り、その領域内の重力効果を摩擦力で、領域境界の応力を外力載荷装置で表現する。この方法で模型内に生じる応力を垂直方向および水平方向に分けて考えると以下に示すようになる。

3・1 垂直方向の応力

Fig. 1(a)のように、原地盤において垂直応力 σ_z は、深さ z に比例するとする。

$$\sigma_z = \gamma \cdot z = \gamma \cdot (z_0 + z_1) \quad \dots\dots\dots (1)$$

Fig. 2 The principle of base friction.

ただし、 γ は原地盤における単位体積重量、 z_0 は地表面から、設定した任意領域の上端までの深さ、 z_1 は任意領域で設定された空洞の深さである。

一方、底面摩擦模型実験で、摩擦力により模型内に生じる応力状態を示すとFig.2のようである。 $dz' \times t$ なる微小要素に働く摩擦力 $d\tau'$ は次のように表される。

$$d\tau' = \mu_b (\gamma' \cdot t + p_{air}) dz' \cdot W \quad (2)$$

ここで、 μ_b は模型とプレート間の摩擦係数、 p_{air} は模型表面に作用させる空気圧、 γ' は模型の単位体積重量、 t は模型の厚さ、 W は模型の幅、 z_1' は模型上端から空洞中心までの深さを表す。

したがって、摩擦力により模型内において生じた垂直応力 σ_{z1}' は次のように表される。

$$\sigma_{z1}' = \int d\tau' / (W \cdot t) = \mu_b (\gamma' + p_{air}/t) z_1' \quad (3)$$

模型領域上部境界の垂直応力 σ_{z0}' を、垂直方向のジャッキによって与えたとしたら

$$\sigma_{z0}' = p_v \quad (4)$$

ただし、 p_v はジャッキの圧力を表す。したがって、模型内の深さ z' の位置に作用する応力は次式のようにになる。

$$\sigma_z' = p_v + \mu_b (\gamma' + p_{air}/t) z_1' \quad (5)$$

一方、力学的相似条件に基づき、応力スケールを Σ とすると、式(1)および式(3)により、ジャッキおよび摩擦による応力は次のようになる。

$$\gamma \cdot z_0 / \Sigma = p_v$$

$$\gamma \cdot z_1 / \Sigma = \mu_b (\gamma' + p_{air}/t) z_1' \quad (6)$$

ゆえに、模型内の垂直方向応力は、応力スケール Σ をパラメータとして表現できる。一方、応力スケール Σ は次のように与えられる。

$$\Sigma = \frac{\sigma_z}{\sigma_z'} = \frac{t \gamma (z_0 + z_1)}{\mu_b (\gamma' t + p_{air}) z_1' + p_v t} \quad (7)$$

また、 $p_{air} \gg \gamma' t$ であるから

$$\Sigma = \frac{t \gamma (z_0 + z_1)}{\mu_b p_{air} z_1' + p_v t} \quad (8)$$

ここで、 $p_v = \gamma \cdot z_0 / \Sigma$ 、または $p_v = z_0 = 0$ を式(8)に代入することによって従来の応力スケールと同じ式¹²⁾、すなわち

$$\Sigma = t \gamma A / \mu_b p_{air} \quad (9)$$

を得ることができる。ただし、 A は模型の幾何スケール、 $A = z_1 / z_1'$ である。よって、応力スケール Σ は、上載荷重を考慮した場合でも浅い空洞の場合と同様の条件で実験を行うことができる。

以上のように、幾何スケール A 、空気圧 p_{air} を与えることにより、応力スケールは一意的に決定される性質を持つ。その結果、幾何学的な条件を相似にするだけでなく、応力に関する相似条件も成立し、原地盤の状況を忠実にシミュレートすることができる。

しかし、単に以上のような原理を満足すればよいのではなく、装置各部の設計上の能力の限界も考慮した上で設計を行っていく必要がある。式(9)で示されるように応力スケール Σ は、摩擦係数

表1 実験装置の特性値

原地盤の単位体積重量	$\gamma = 0.0025 \text{ kgf/cm}^3$
模型の厚さ	$t = 2.5 \text{ cm}$
幾何スケール	$A = 100$
空気圧	$p_{air} = 0 \sim 2.0 \text{ kgf/cm}^2$

μ_b と模型表面に作用する空気圧 p_{air} に支配される。所定の深度の高い応力を発生させるためには摩擦力の増大はもちろん必要であるが、取り扱う模型が二次元であるため、平面ひずみ状態も同時に満足させることが必要である。摩擦力の増大には空気圧を増加させることになるが、逆に空気圧を増大させると応力スケール Σ は次第に減少する。そのため、より深い地盤内の応力状態を表現するためには、載荷装置の能力を大きくする必要がある。さらに、過大な空気圧を作用させると、模型の底部における地山状態での破壊を促す結果となり、実験本来の目的とする空洞掘削による周辺の破壊状態を把握することが困難となるので、できるだけ避けるべきである。そのため、空気圧を増大することによって平面ひずみ状態を満足することが可能となっても、結果的には、原地盤の高い応力状態を十分に表現することができないので、平面ひずみ状態は従来と同程度に満足していれば実験に支障をきたすことはないと考え、深部の大きな応力状態に関しては、摩擦係数を小さくし、応力スケールを変化させる方針をとった。式(9)より、摩擦係数 μ_b は以下の式で表される。

$$\mu_b = \gamma A t / \Sigma p_{air} \quad (10)$$

実験装置の寸法や容量、および実験の実際上の問題、精度等により決められた数値は表1の通りである。

応力スケール Σ は1～50程度の値となることが望ましく、空気圧 p_{air} が最も低い値を考慮しておけば、それ以上の空気圧に対しては十分に条件を満足する摩擦係数を設定することが可能である。そのため、上記の数値と空気圧 $p_{air} = 0.1 \text{ kgf/cm}^2$ を用いて適切な摩擦係数を求めた結果、摩擦係数 μ_b を約0.1～0.3の範囲内に収めることが必要となる¹⁴⁾。摩擦係数は、接触する二つの材料との関係によって決定されるものであり、材料自身のそれとは異なり、組合せによってかなり異なる数値を示す。そのため、摩擦力を与えるプレートの材料および模型材料の両面から検討を行っていく必要がある。

このように、新装置は従来の装置よりも大きな応力スケールを採用し、加える空気圧、側圧、上載荷重をあまり大きくせず、実験の精度および装置の能力の限界をも考慮した設計となった。

3・2 水平方向の応力

水平方向の応力は、不連続な地盤内の空洞の安定性に敏感であり、水平方向の境界条件としてその分布や大きさを明確にしておく必要がある。

この模型は、垂直、水平方向とも拘束された条件の中で実験が行われる。垂直方向に初期地山応力に相当する応力が載荷されると、模型は水平方向にポアソン比に従って、水平方向の変位を拘束すると拘束応力が模型と外枠との間に発生する。模型材料のポアソン比 ν は、たとえば0.2とすると、水平方向からの載荷を行わずとも模型の左右の境界付近を除いては、ポアソン比により垂直応力の0.25倍の水平応力が発生している。従来の装置では、Fig. 1(b)に示すように、模型の上端は地表面境界であるため、深さに比例した三角形に分布した水平応力を加えていた。しかし、深い岩盤内で水平方向の応力が上記の応力以上となる場合には、水平方向にも所定の応力を加える必要がある。また、模型は地盤内の任意領域を対象としているため、模型に加える水平方向の応力分布はFig.1(a)のように台形分布となる。模型の領域が、地表面からの深度に比べて小さいとき($z_0 \gg z_1$)は、荷重を等分布と近似

することが可能となる。

また、このような水平方向の応力は剛な載荷面ではなく、できる限り柔らかい載荷面を用いて載荷することを考える。

4. 新しい底面摩擦模型実験装置の仕様および特徴¹⁵⁾

以上のような検討を行った上で、新たに開発した底面摩擦模型

Fig. 3 New base friction apparatus.

Fig. 4 New base friction apparatus.

Fig. 5 Vertical loading system.

実験装置の全体図をFig. 3とFig. 4に示す。新装置の仕様および特徴として、次の点が挙げられる。

(1) 装置の大きさおよび縮尺は実用的な範囲内にする。幾何学的縮尺を1/100～1/200とし、模型実験として取り扱いやすい大きさとする。模型は、地盤内の特定領域のみをモデル化し、土かぶりの大きさを上載荷重として表現することにより、任意の深度の空洞を表現することができるようにした。したがって、Fig. 3とFig. 4のように、新装置は従来のものと比べて相当にコンパクトになった。装置は、プレート移動方向におよそ1.7m、水平方向1.3m、高さ1.0mの大きさで、模型は500mm×500mmの正方形である。上蓋は、アクリル製の観測窓を設けたものと試料作製の鋼製の2種類が用意されている。

模型表面に作用させる空気圧は、最大6.0 kgf/cm²である。実験にはアクリル板の強度からみて、最大2.0 kgf/cm²の空気圧しか使用しないが、試料締固めを装置内でできるようにしており、かなり余裕を持って設計されている。また、実験で用いるアクリル板付きの上蓋は、厚さ30mmを2枚重ねた観測窓を持つ構造で、従来の装置よりかなり厚いものとなっている。また締固め時には、厚さ30mmの剛板製の上蓋を用いる。

(2) 本体とフレームは一体化し、摩擦板は、スリット状に貫通する方式とする。その場合、摩擦力の計測は、模型下部境界に障壁板を設け、その障壁板に作用する荷重を2個のロードセルで直接計測する。この方式とすると剛性が高いため、高い空気圧や摩擦による引張力にも容易に耐えられるようになった。また摩擦力も正確に得られる。プレートの駆動方式は、摩擦力が大きいときにも安定した速度で移動できるように、電動スクリーューギアにより直接プレートを駆動させる方式を取り、変速機付き電動スクリーューギアにより、移動速度は1～200 mm/minの範囲で任意に調節することができる。

(3) プレートの摩擦係数を実験の目的によって変えられるようにする。プレートの表面部分を脱着可能なカートリッジ式にして置き、異なる摩擦係数をもつ表面プレートを実験の目的に応じて取り替える。

(4) 垂直方向の外力載荷装置は分割載荷方式をとる。模型上端は、空洞の変形により通常不均一な変位を生じる。このため、大きな変位にも追従できるようにペロフラムシリンダーからなる6連の多連式載荷装置(Fig. 5)を採用した。地表面境界を考える場合には、載荷板は脱着可能である。載荷装置は最大2 tまでの荷重を載荷することが可能である。載荷板は、模型の変形に対して柔軟に対応できるように回転をゆるす構造となっている。また、載荷板とプレートが接触する面には、テフロン加工が施されており、プレートとの摩擦力の低減がなされている。

(5) 水平方向の外力装置は柔らかい載荷面をもつ載荷方式をとる。水平方向の載荷は、垂直方向の変位量に比べ、変位量は小さいため、ゴム袋を利用してモデルに隙間なく載荷することを考えた。しかし、ゴム袋だけでは、所定の応力を得るのに限界があり、またストロークも不足するためフラットジャッキを併用した載荷装置とした。水平方向の載荷装置は、最大1 tまで載荷することが可能である。その際、ゴム製の載荷板には空気室を設け、最大8 kgf/cm²までの空気圧に耐えられるように設計してある。ストロークが不足の場合は、その載荷板をフラットジャッキによって押し込むことができる。

5. 大深度問題への適用例と考察

製作した新しい底面摩擦模型実験装置の性能の確認のために、同装置を用いて、大深度地下空洞の安定機構や開削シミュレーション

Fig. 6 (a) Proragation of cracks, (b) deformation vectors around the opening at the 100 m depth in the homogenous rock mass.

ンなどについて、いくつかの模型実験を行った。Fig. 6とFig. 7はその2例を示す。

Fig.6には、空洞深度が大きな場合として、深度100mの位置に空洞を開削した場合の空洞の安定性およびその周辺の挙動の実験結果を示す。模型は均質地盤で、幅10m、高さ4mの矩形空洞が存在する場合をモデル化した。幾何スケールを100とし、空洞は模型内で幅10cm、高さ4cmの大きさで表現した。空洞の開削は、模型内に所定の初期地山応力を発生させた後に行われる。すなわち、模型の上面境界に土被りに相当する上載荷重を、側面境界にも所定の側圧を載荷している状態で、摩擦プレートを移動させ、模型底面に発生する摩擦力が一定となったところを確認してから、プレートを一時停止し、上蓋を外し、模型内に空洞を開削する。

均質な地盤模型材料として、Karlsruhe 大学で開発された硫酸バリウム、酸化亜鉛、ワセリンの混合試料を用いた¹²⁾。硫酸バリウムと酸化亜鉛は、その粒径がそれぞれ異なるためよく混ざり合い、ワセリンが両者の混ざりに粘着性を与えている。この混合試料は、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、それを一定圧力で押し固めて、模型を作製する。この模型材料の力学的特性は、単位体積重量が $\gamma' = 2.0 \times 10^{-3} \text{ kgf/cm}^3$ の場合、一軸圧縮強度 $\sigma_c = 1.84 \text{ kgf/cm}^2$ 、内部摩擦角 $\phi = 39.2^\circ$ 、ヤング率 $E = 610 \text{ kgf/cm}^2$ である¹⁴⁾。模型内に作用する応力スケールは、式(9)より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 0.4 kgf/cm^2 の空気圧を作用させ、模型と摩擦プレートの摩擦係数は0.1であるため、模型と原地盤との力学スケールは1/15.6となり、原型の一軸圧縮強度が 28.7 kgf/cm^2 の岩盤を想定したことになる。

空洞周辺の破壊状況をFig.6(a)に示す。き裂は、空洞天盤の左右の隅から発生する。このき裂は空洞隅角部の応力集中によりせん断破壊が生じて発生するき裂であると考えられる。最初にき裂は発生点から地表面に向け上方へと進展する。しかし、次第にその方向を模型の中心軸の方に変え、左右のき裂が閉合するようにアーチ状のき裂を形成する。また、空洞上部のき裂が進展すると

Fig. 7 (a) Proragation of cracks, (b) deformation vectors around the opening at the 50 m depth in the discontinuous rock mass.

共に、空洞下盤の左右の隅からもき裂が発生し、盤膨れが確認される。さらに、破壊が進むと空洞側壁部が空洞内に押し出される現象が確認される。

空洞周辺の変位状況をFig.6(b)に示す。変位は、空洞の周辺で大きく、中心から離れるに従い小さくなる。変位ベクトルの方向は、空洞より上の領域では、空洞に向かって下向きに、空洞より下の領域では空洞に向かって上向きの方向を示す。変位量が最大の点は上下方向とも、空洞の中央部で見られる。

Fig. 7には、不連続性の卓越した成層岩盤内に開削した空洞の安定性およびその周辺の挙動を示す。空洞の深度は50mとした。成層岩盤模型として、石膏、石灰、標準砂、水の混合試料を用いた¹⁵⁾。石膏の遅延剤としてリグニンスホン酸カルシウムの遅延剤を石膏量の約5%混入し石膏の凝結効果を遅らせる。この混合試料は、石膏、石灰、砂、水を重量比で1:3:12:3.61で配合し、 $500 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ と $500 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ の型枠を用いて細長い角柱状に作製、整形する。それを装置上に並べて水平な不連続面（層理面）を有する岩盤、すなわち、間隔が1cmと2cmの水平な層理面のモデルを作製した。層間には、不連続性のせん断強度を減らすため2cm程度に切った薄いテフロンシートを入れた。この岩盤中に幅12cm、高さ4mの矩形空洞を開削した場合を想定した。幾何スケールは100とし、空洞は模型内で幅12cm、高さ4cmで表現される。なお、空洞の開削方法は均質地盤の場合と同様である。実験では、模型表面に 1.0 kgf/cm^2 の空気圧を作用させ、摩擦係数0.2のプレートを使用した。そのため、模型と原地盤との力学スケールは1/3となる。模型の一軸圧縮強度が 15 kgf/cm^2 であることから、原型の一軸圧縮強度が 45 kgf/cm^2 の岩盤を想定したことになる。

Fig.7(a)には空洞周辺の破壊挙動を示す。き裂の発生は最初に、空洞の直接天盤（空洞直上の層）の中央部にまっすぐ上方に向かって層を横切る形で発生する。次に直接天盤の両端からき裂が発生する。このき裂は空洞の左右の隅に向かって下向きに進展する。成層岩盤の場合、空洞の直接天盤は、空洞をスパンとする一つの梁であると考えられる。そのため、直接天盤の中央部で発生する

き裂は、下縁の引張り破壊によるき裂であり、左右に発生するき裂は、上縁の曲げ破壊によるき裂であると考えられる。直接天盤の層が破壊した後、同じ亀裂の発生が徐々に上層へ進展していくが、層のスペンは次第に短くなるため、ある高さになると亀裂は進展しなくなり安定する。本実験では、き裂の発生は空洞上方の6層目に終息した。

空洞周辺の変位ベクトルの状況をFig.7(b)に示す。空洞の直接天盤の中央部で、空洞の高さとほぼ等しい大きな変位を生じた。また、空洞の上方に行くほど層の変位は小さくなることから、層と層の間には離層(層間にすき間を生じる現象)の生じていることが分かる。

6. 結 言

大深度の地下空洞の安定機構を容易にかつ正確に把握するために、新しい底面摩擦模型装置の設計製作を行った。これによれば、

(1) 幾何スケール100では深度150mまで、200では深度300mまでの模型実験が可能である。すなわち、新装置は浅い空洞の場合だけでなく、大深度空洞の安定解析にも十分に対応できる。

(2) 空気圧を用いて摩擦力を制御し、厳密な相似則に基づいた幾何スケールおよび応力スケールを導入することによって、従来の同種の装置に比べてより定量的にシミュレートすることができる。

(3) 装置自体の特徴としては、垂直方向と水平方向の載荷装置を有すること、本体とフレームを一体化すること、正しい摩擦力の計測を可能にすること、データ記録処理のための画像解析システム¹⁵⁾を有することが挙げられる。

(4) 連続的および不連続的地盤内に開削した、比較的深い空洞周りの地山の力学的挙動を究明するために、本装置で行った二つの実験例を紹介したが、良い成果を得ることができたといえよう。

一方、新しい底面摩擦模型実験装置の試作・改良とともにそれ

のための画像解析システムの開発も同時に行っているため、次報より画像解析システムおよびそれを用いた模型挙動の定量的評価法を紹介する予定である。

なお、本研究は平成2年度文部省科学研究費補助金(試験研究B2, 課題番号63850138)で行われたものである。

引 用 文 献

- 1) Bray, J. W. and Goodman, R. E. : Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr., Vol. 18, p. 453-468, (1981)
- 2) Hoek, E. : Rock Engineering, Imperial College, Univ. of London, (1971)
- 3) Goodman, R. E. : Proc. Int. Conf. on Stability in Open Pit Mining, Vancouver, p. 125-132, (1972)
- 4) Bieniawski, Z. T. : Rock Mechanics Design in Mining and Tunneling, A. A. Balkema, Boston, p. 164-168, (1984)
- 5) Whyte, R. J. : Univ. of London, London, England. M.Sc. Thesis, (1973)
- 6) Shimada, S. : Observation of roof fall mechanism modeling jointed rocks by Modified Base Friction Method, 資源と素材, Vol. 108, p. 449-454, (1992)
- 7) Egger, P. A. : Int. Colloquium of Geomechanical Models, ISMES, Bergamo, p. 67-81, (1979)
- 8) Egger, P. A. and Gindroz, C. : Proc. 4th Cong. of Int. Soc. for Rock Mechanics, Montreux, p. 121-136, (1979)
- 9) Baumgartner, P. and Stimpson, B. : Int. J. Rock Mech. and Min. Sci., Vol. 16, p. 265-267, (1979)
- 10) Teme, S. C. : Int. J. Min. and Geol. Eng., Vol. 5, p. 75-81, (1987)
- 11) 川本朮万・尾原祐三・市川康明 : 日本鉱業会誌, Vol. 99, p. 1-6, (1983)
- 12) 西田 正他 : 九州大学生産科学研究所報告, 74号, p. 17-24, (1983)
- 13) Kameda, N. et al. : Proc. 28th US Symp. on Rock Mechanics, p. 789-796, (1987)
- 14) 江崎哲郎他 : 第22回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, (1990)
- 15) 江崎哲郎 : 平成2年度科学研究費補助金(試験研究B2)研究成果報告書, 九州大学工学部, (1991)

➡ 資料お預けいたします

環境調和型社会へ向けて

環境工学部門委員会設立記念講演会要旨集

平成5年6月2日

(社)資源・素材学会環境工学部門委員会

目 次

1. 環境工学部門委員会の発足にあたって.....	1
東京大学工学部 資源開発工学科 教授 井上外志雄	
2. 環境対策の最近の動向.....	3
上五島石油備蓄株式会社 社長 佐藤淳一郎	
3. 石灰石等露天掘採掘事業における環境管理.....	17
武甲鉱業株式会社 社長 阿部徳之助	
4. 環境問題とメタルプロセッシング.....	29
宮城工業高等専門学校 校長 矢沢 彬	

B5・41頁 / 定価3,000円(税込)・送料別

— 資源・素材学会へお申込み下さい —