

(40) 大深度地下利用のための定量的模型実験装置の開発

九州大学工学部 正会員 江崎 哲郎
正会員 木村 強
○学生会員 三谷 泰浩
蒋 宇静
九州共立大学工学部 正会員 亀田 伸裕

A Development of Quantitative Scale Model Testing Apparatus for Underground Utilization at a Depth

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

Abstract

The base friction technique is one of the effective and quantitative experimental methods taking account of gravity field. A base friction apparatus has been developed for studying the stability of shallow underground excavation and settlement of the ground surface. This study describes a trial production of the new base friction apparatus for underground utilization at a depth, though current base friction apparatus has been limited for fitting within shallow depth, and some tests by using it. 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 used as frictional plate according to the purpose of tests. This development of the new base friction apparatus enables quantitative research of the deep underground.

1. はじめに

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。地下開発を行う上での問題は、第1に地下に関する情報は不確実であることが多く、正確には掘削するまで分からないこと、また地下深部での開発経験が少なく、地盤の挙動、地下水の流動など未知の部分が多いことである。第2に、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、軟弱な地盤での立地も余儀なくされることである。このような深部地下地盤に、ある広がりや錯雑さをもつ空間群を掘削、建設するにあたっては、従来の地下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。F.E.M.などによる数値解析は、まず、当然行うべき手段である。しかし、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、さらには、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の問題点がある。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。

筆者らは、従来より底面摩擦模型実験装置を開発し、模型実験を行ってきた¹⁾。底面摩擦模型実験は、垂直二次元的地盤模型を摩擦板上に水平に置き、底面に摩擦力を与えることにより、模型内に重力に相当する物体力を発生させて、現地盤をシミュレートする模型実験の手法である。この実験では、他の重力効果模型

実験に比べて安定した重力効果を得ることができ、模型自体も小型で、不連続面を有する複雑な岩盤のモデル化も可能である。さらに、模型の変形・破壊のプロセスを逐次観察できることや、現地地盤との相似性も良く成り立つ特徴をもつ。そして、この装置を用いて地表面近くの地下に位置する空洞の挙動に関する実験を行い、浅所地下空洞の崩落のメカニズムを明らかにした²⁾。しかしながら、深部地下を対象とする場合には、深部地盤内の高い応力状態を表現できないことや、地盤の境界条件を十分に満足していないことなど、深部地下空洞を表現するためには多くの問題点が生じてきた。そこで、従来の装置を改良、発展させ、深部地盤内（地下約300m程度まで）の空洞の挙動解析が可能な装置の開発を試みた。

2. 従来の装置の問題点および新装置の特徴

今回開発した装置の概略図をFig.1に示す。以下、従来の装置の問題点および新装置の特徴について述べる。

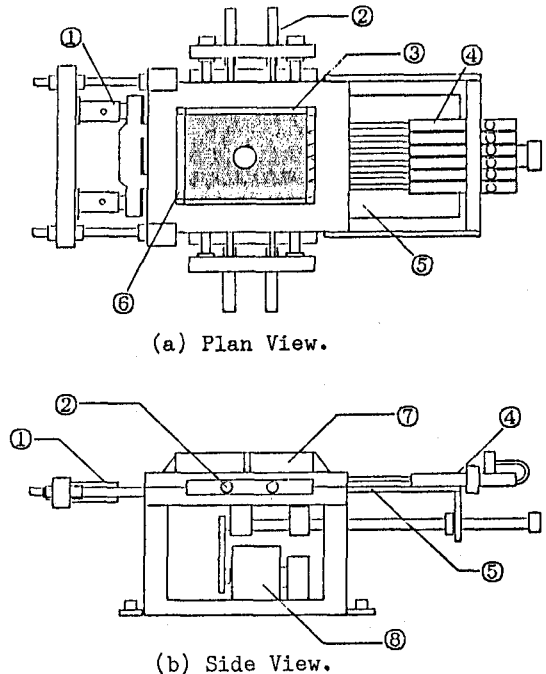
(1)装置の大きさおよび縮尺

自然の重力を利用する模型実験において、相似則をある程度満足させるには、縮尺は1/10~1/20程度にとられることが多い。この場合、実験装置は非常に巨大なものとなり、模型製作および载荷装置の能力など経済性、作業性の面で負担が大きい。これに比べて、底面摩擦模型実験装置では、幾何学的縮尺を1/100~1/200とすることができるため実験の精度を保持しながら模型を室内実験として取り扱い易い大きさとする事ができる。しかし、従来の装置では、Fig.2(a)のように模型に地表面の境界が必要であるため地表下約50mまでに存在する空洞しか表現できず、縮尺を大きくすれば模型の精度を悪くせざるを得ないといった制限があった。新装置では、Fig.2(b)に示すように、土かぶりの大きさを変化させることにより、地下のある特定領域を対象として表現することができる。

(2)境界条件およびその载荷と計測

(a)下部障壁

従来の装置では、額縁状のフレームを摩擦板上におき、その上端に取り付けた力計で模型に作用する力を計測している。このようなフレームは剛性が小さく、模型表面の空気圧、模型左右、上下の圧力が大きいと枠自体が変形しやすい。さらに、このフレームが空気圧によって浮き上がるのを防ぐために本体にボルトで連結しているため、力計に表れる値は、フレームの受ける種々の力の影響を受けるため、模型に作用する重力の正確な値を得ることはできない。そこで、装置本体とフレームを一体化させ、高い空気圧にも十分耐えられるように本体の剛性を高めた。また、摩擦力の計測



- ① load cell
- ② lateral loading jacks
- ③ rubber bags
- ④ vertical loading jacks
- ⑤ friction plate
- ⑥ barrier beam
- ⑦ cover plate
- ⑧ geared motor

Fig.1 Base friction apparatus.

は、下端境界の障壁に作用する荷重を直接にロードセルで計測する。これにより、模型本体に作用する荷重の正確な計測が可能となった。

(b) 水平方向境界条件

地盤の境界条件は、空洞の安定に大きな影響を及ぼすので明確にしておかねばならない。従来の装置では、水平方向応力の载荷は、剛な載荷板を用いて载荷を行ってきた。したがって、ひずみ分布が三角形となるが、応力分布は必ずしもそうはならず、変形に追従するような載荷板を用いて载荷すべきである。そこで、水平方向の外力载荷装置は、ゴム袋を利用してモデルに均等に载荷することを考えた。载荷容量は、合計1tonである。ゴム袋の耐力は、最大800kPaまで耐えられるように設計してあるため、ゴム袋のみでも十分な载荷が可能であるが、模型に常に一定の荷重を作用させること、ゴム袋の変位量の限界などを考慮し、ゴム袋とフラットジャッキを併用した载荷方式をとる。

(c) 垂直方向境界条件

垂直方向の外力载荷装置は、空洞天盤の変形により模型上端で生じる不均一な地盤変動に、常に追従できるように6分割して载荷できるようにした。垂直荷重は、空気圧をベロフラムシリンダーにより分割したジャッキに均等に作用させる荷重負荷方式で、ジャッキには合計2.0tonの荷重を载荷することが可能である。ジャッキのストロークは模型の移動量を考慮して50mmとした。さらに、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。

(3) 摩擦板

従来の装置では、他の底面摩擦模型実験装置がベルトを使用し、しかも比較的速い速度を採用しているのに対し、チェーンで連結されたプレートを、ギアモーターにより非常にゆっくりとした速度で移動させる方式を採用し、良好な結果を得ていた。この方法も、大きな空気圧を作用させると、チェーンの伸びなどの影響のためスムーズなプレートの移動ができなくなる。そこでプレートの駆動方式は、電動スクリューギアによりプレートを直接駆動する方式を採用した。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。摩擦プレートの摩擦面は、脱着可能なカートリッジ式であり、装置本体にスリットを設け、その中に差し込む方式を採用しており、実験の目的に応じて取り替えることが可能である。深部の地盤内には大きな応力が加わるため、従来と同じ材料を用いるならば、応力スケールは大きくしなければならない。一方、模型表面に作用させる空気圧は、より大きくなるので、重力を小さくするためには摩擦係数を低減させる必要があり、深部地盤を表現する際にはテフロンを用いることにした。テフロンと模型間の摩擦係数は約 0.20 であり、従来のウレタンの摩擦係数0.35 に比べると約 2/3 の大きさとなる。このように、摩擦係数の異なるプレート（テフロン、ウレタン）を用意することにより、広範囲の深度に対応できる装置となる。

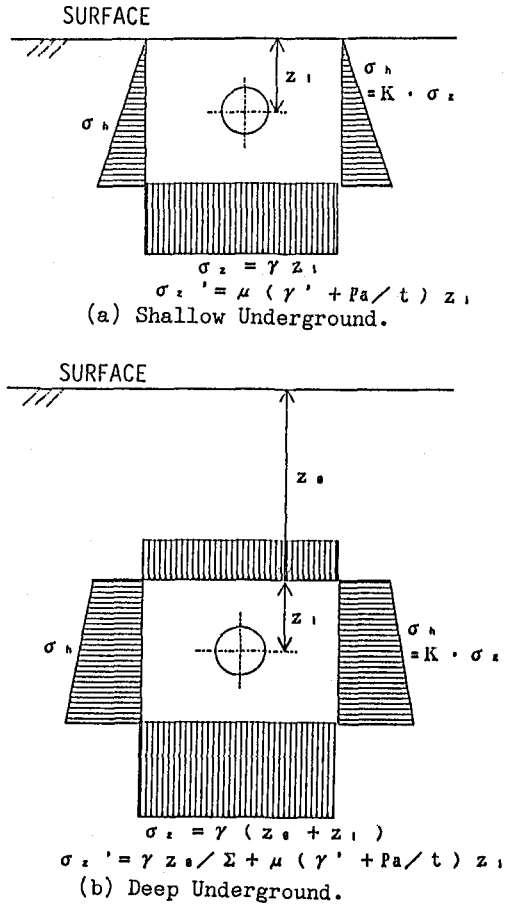


Fig.2 Base friction model and boundary conditions.

(4)平面ひずみ状態

底面摩擦模型実験は、垂直二次元化したモデルを用いて行う模型実験であるため、模型は平面ひずみ状態を満足させる必要がある。深部地下を表現する場合、高い応力を模型内に発生させるため、材料の性質から完全なる平面ひずみ状態を満足させることは不可能であるが、模型表面に高い空気圧を作用させることにより、浅い場合と同程度の平面ひずみ状態を満足させることは可能である。模型表面に作用させる空気圧は、最大600kPaである。今回、実験には最大 200kPaの空気圧しか作用させなかったが、試料形成を装置上で行うという理由からかなり大きな空気圧まで作用できるように設計されている。そのため、上蓋の亚克力板は、従来の装置よりかなり厚いものとなっている。また試料成形時には、安全性を考え鋼板製の上蓋を別に用意した。

3. 実験結果および考察

今回の実験は、試作機の基本的性能を把握し、実験方法を確立する目的で、均一な地盤を仮定して基礎的実験を行った。そのために、地下地盤深部に設けた空洞の変形・破壊挙動を調べるとともに実験の妥当性を示すために実験結果とF.E.M.解析との対比を行った。さらに、浅部地下と深部地下における空洞との破壊状況の比較を行った。均質地盤模型材料として硫酸バリウムと酸化亜鉛、ワセリンを重量比で 70:21:9で混合した試料を使用した。模型は幾何学的縮尺を100として、地下深度100m の地点の空洞幅10m、高さ2mの矩形空洞を想定して実験を行った。実験の方法は模型空洞内に所定の応力を発生するように模型表面に空気圧、側圧、さらには、模型外の土かぶり荷重相当分の上載荷重を載荷し、摩擦プレートを移動させることにより、地盤内の状況をシミュレートした。さらに、空気圧を段階的に増加させることにより地盤の強度を徐々に低下させたときの挙動特性を調べた。Table.1 に各空気圧に対する応力スケールおよび空洞中心における応力値を示す。結果の処理として、画像解析装置³⁾を用いて地盤の変位量および空洞の破壊状況の計測を行った。

(1)F.E.M.解析との比較

Fig.3 に、画像解析による空洞周辺の変位ベクトル図を示す。空洞天盤中央で 708mmの沈下量を生じており、空洞下盤中央部では 508mmの盤膨れを生じている。これに対して、F.E.M. 解析では(Fig.4)、空洞天盤中央で730mmの沈下、空洞下盤中央で 520mmの盤膨れが生じており、実験結果とほぼ同じ結果を示す。このことから、新しい底面摩擦模型実験装置は十分に深部地下空洞の状況を

State No.	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
Pa(kPa)	10	20	30	40	50	60
Σ (-)	25.0	12.5	8.33	6.25	5.00	4.17
σ_z (kPa)	81	161	241	321	401	481
σ_h (kPa)	41	48	72	96	120	144

Pa: Air Pressure Σ : Scale of Stress
 σ_z : Vertical Stress σ_h : Horizontal Stress

Table.1 Used air pressure, scale of stress and stresses under the dimensional $\Lambda=100$.

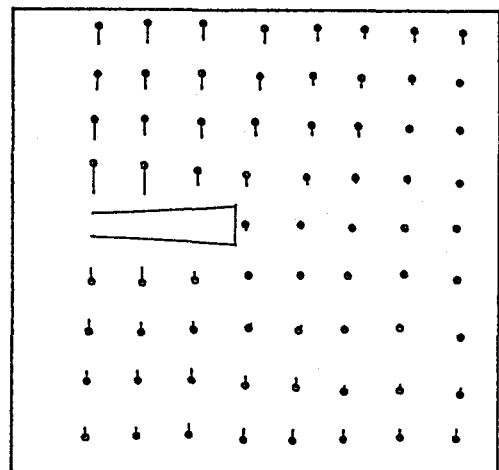


Fig.3 An example of deformation vectors by the new apparatus.

表現することが可能であるといえる。

(2) 模型の破壊状況について

F.E.M.などの数値解析は、あくまでも連続体を仮定した解析であるため、クラック発生後の模型の挙動を調べることは困難である。地下深度100mの実験において、クラックは $P_a=30$ kPaの時に、空洞右天盤隅から発生した (Fig.5(a))。そして、空気圧を上昇させるに従い、最終的にはFig.5(b)に示すような破壊状況を示した。地下深度 25mの浅所地下空洞の場合は、Fig.6 に示すような破壊状況を $P_a=30$ kPaの時に示した。どちらの場合にも、空洞天盤にアーチ状の崩落がみられるが、深部空洞の場合は崩落高さが小さい、また空洞下盤

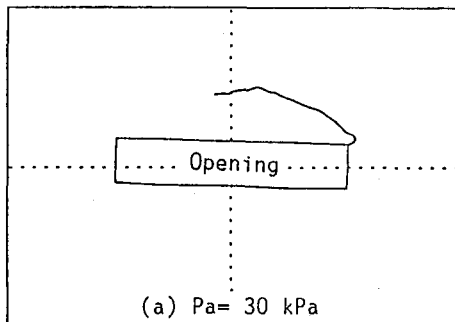


Fig.5 Propagation of cracks around deep underground opening.

の盤膨れが大きく、空洞下盤にもクラックが生じている。空洞天盤隅にもクラックが発生しているが、深度が大きくなると土かぶりおよび土圧による影響が大きくなるため、浅部空洞の場合に比べてクラックの進展範囲が小さい。

4. あとがき

今回は、深部空洞の変形・破壊の地盤の挙動を容易にかつ正確に把握するために、大深度地下利用のための定量的模型実験装置である底面摩擦模型実験装置の開発を行った。実験結果と数値解析との比較の結果、ほぼ同様の結果を得ることができた。この結果、本装置は、深部地下地盤の挙動特性を知るためにも有力な道具であると期待している。今回の実験は、装置の妥当性を確認することが目的であったため、均質地盤を対象にしたが、本来、模型実験は、不連続地盤に対する挙動特性を調べることを特徴としており、大深度不連続地盤の挙動特性、さらには種々の形状や配置をした複数空洞の問題について研究していく予定である。

参考文献

- 1) 西田 正 他 : 九州大学生産科学研究所報告, 74号, pp.17-24, 1983
- 2) Nobuhiro Kameda et al. : Proc. 28th US Symp. on Rock Mechanics, pp.789-796, 1987
- 3) 江崎 哲郎 他 : 第21回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.246-250, 1989

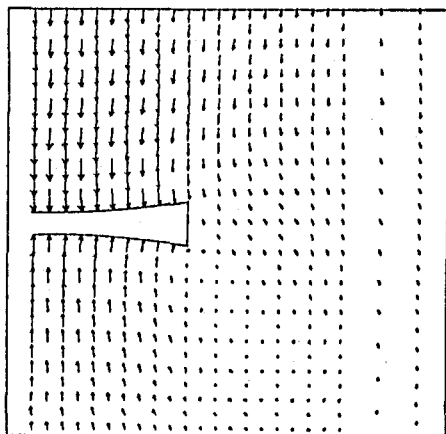


Fig.4 Deformation vectors by F.E.M. analysis.

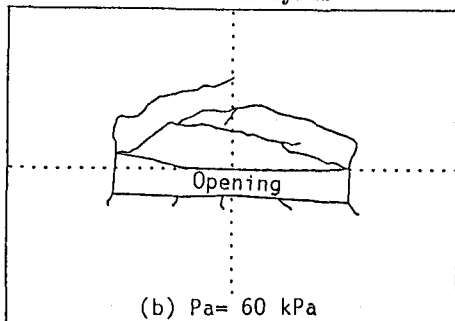


Fig.6 Propagation of cracks around shallow underground opening.

