

# 地下近接施工による地盤環境的相互影響の模型実験的評価

蔣 宇静\*・棚橋 由彦\*  
杉野 秀一\*\*・今長谷 秀亮\*\*

## Experimental study on the mechanical behaviour of the adjacent openings

by

Yujing JIANG\*, Yoshihiko TANABASHI\*  
Hidekazu SUGINO\*\*, Hideaki IMAHASE\*\*

This study is to clarify the mutual influence due to the adjacent excavation near to the existed opening by using the base friction model apparatus and the picture analyzing system. The varied factors included the mechanical characters of the ground, the nearness and depth of openings. In order to reduce the influence to the existed opening, the stabilizing effects of inner supports on the extent of failure zone and deformational behavior of surrounding rock mass and pillar are investigated and discussed.

### 1. はじめに

今日、大都市圏の地下利用をはじめとして、エネルギー施設、放射線廃棄物の地層処分、埋施設などの大規模な地下開発利用が注目されている。しかし、このような状況の中で、地下空洞工事の課題の一つとして、既存の地下構造物との近接施工が挙げられる。例えば、既設空洞の近くに、新規に空洞を掘削した場合には、相互の空洞周辺の地山応力の変化による各空洞の安定性への影響が問題となる。一般に双設トンネルの中心間距離は、掘削幅の約3倍以上をとることが推奨されている<sup>1,2</sup>が、用地取得の点からはできるだけ近接させて設けることが有利である。

そこで、本研究は様々な地山条件で近接施工された地下空洞の相互影響を実験的に評価することを目的とし、現時点で他の二次元地盤模型実験装置に比べ、岩盤の挙動を表現する上で最も優れた重力効果模型実験装置であるといわれており、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、応力スケールを導入することによって、実験的に原地盤を忠実にシミュレートできる特徴をもつ底面摩擦試験装置を用いて実験を行い、考察と影響評価を行う。

### 2. 底面摩擦模型実験装置の概要について

#### 2.1 実験装置の概要

底面摩擦模型実験は、一定速度で移動する摩擦面上に

二次元の縮小地盤模型を水平に設置し、その模型の底面に摩擦を与えることにより重力場を表現し、空洞およびその周辺地盤の挙動をシミュレートする模型実験である。この実験の特徴は、原地盤との幾何学および力学的相似則とともに満足でき、モデルの変形・破壊挙動を連続的にかつ視覚的に観察できることにある。図-1に実験装置の概略図を示す。

#### 2.2 底面摩擦模型実験の原理

底面摩擦法の基本的な原理について説明する<sup>3,4</sup>。

図-2のように、模型中の微小要素 $d_x$ 、 $d_z$ に働く力を $dF_b$ とし、それは次式で表せる。

$$dF_b = \mu_b (p_{air} + \gamma' \cdot t) dx \cdot dz \quad (1)$$

ここに、 $\mu_b$ ：模型とプレートとの間の摩擦係数

$p_{air}$ ：模型表面に作用する空気圧

$\gamma'$ ：模型の単位体積重量

$t$ ：模型の厚さ

模型が一定の幅 $W$ をもつならば、模型の上端から距離(深さ) $z'$ の位置において作用する摩擦力 $F_b$ は次式のようになる。

$$\begin{aligned} F_b &= \iint \mu_b (p_{air} + \gamma' \cdot t) dx \cdot dz \\ &= \int \mu_b (p_{air} + \gamma' \cdot t) W \cdot dz \\ &= \mu_b (p_{air} + \gamma' \cdot t) W \cdot z' \end{aligned} \quad (2)$$

平成12年10月27日受理

\* 社会開発工学科 (Department of Civil Engineering)

\*\* 大学院博士前期課程環境システム工学専攻 (Graduate Student, Department of Environmental Systems Engineering)

よって、深さ方向に生じる垂直応力  $\sigma_z'$  は次式で表される。

$$\begin{aligned}\sigma_z' &= F_b / (W \cdot t) \\ &= \mu_b (p_{air} + \gamma' \cdot t) W \cdot z' / (W \cdot t) \\ &= \mu_b (p_{air} + \gamma' \cdot t) z' / t\end{aligned}\quad (3)$$

ただし、模型の自重による応力は、模型表面に作用する空気圧による応力に比べて、無視できるほど小さい。したがって(3)式は、次のようになる。

$$\sigma_z' = \mu_b \cdot p_{air} \cdot z' / t = (\mu_b \cdot p_{air} / t) z' \quad (4)$$

このように、原地盤と同様に、模型内に深さに比例した応力分布を得ることができ、その大きさは、空気圧を制御してやることによって任意に設定することができる。

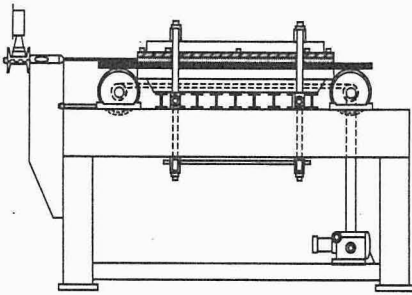


図-1 底面摩擦模型実験装置 (側面)

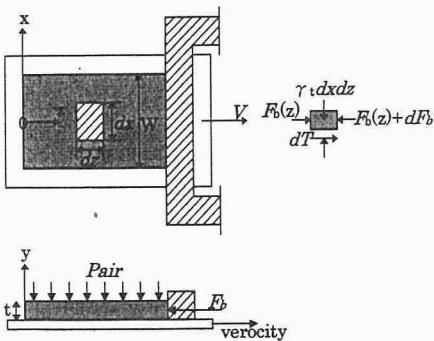
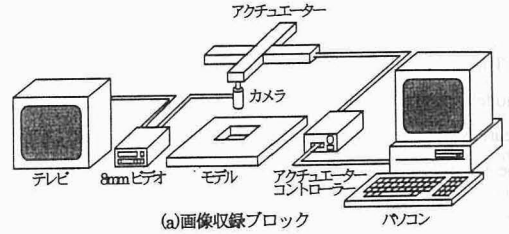


図-2 底面摩擦模型実験の原理

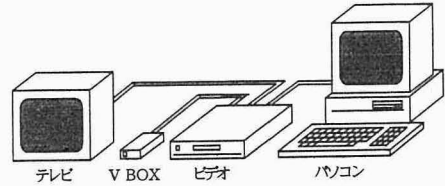
### 2.3 画像解析システムの概要

模型の変形や破壊挙動は、図-3に示される画像解析システムによって処理される。この画像解析システムは、大別して2つのブロックに分かれる。1つは、画像を撮

影し8mmビデオに記録する収録ブロック(図-3(a))で、精度を高めるためアクチュエーターを用いてズームレンズを取り付けたCCDカメラを自動的に移動させて模型を分割して撮影する。もう1つは再生画面を解析処理する解析ブロック(図-3(b))で、8mmビデオに収録された画像をパソコンに取り込み、画像処理ソフトを用いて解析作業を行う。実験前後の各標点の座標変化から変位ベクトルを求めることができる。



(a)画像収録ブロック



(b)画像解析ブロック

図-3 画像解析システム

### 3. 実験材料と実験条件

連続性地盤のモデル材料として、Karlsruhe大学で開発された混合試料(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)を用いた<sup>4)</sup>。模型は、この配合試料をある一定圧力で密度  $\rho$  が  $2.0\text{g/cm}^3$  になるまで押し固め、 $46\text{cm} \times 30\text{cm}$  の地盤モデルを作製した(図-4参照)。ここに、幾何スケールは  $\Lambda=150$ 、模型の厚さは  $t=2.0\text{cm}$ 、模型とプレートとの間の摩擦係数は  $\mu=0.685$  であるため、応力スケールが  $\Sigma=5.47$  と求まった<sup>4)</sup>。原地盤およびモデルの力学的特性はそれぞれ表-1に示す。本模型に直径  $D=9\text{m}$  の既設空洞を地表面下  $40\text{m}$  に掘削した場合を想定した。また、本研究では深度  $40\text{m}$  を想定するため、模型の上部からジャッキにより上載圧を、側部から側圧を与えた。実験は、既設トンネルと新設空洞の中心間距離  $B$  を  $1.5D$ 、 $2.0D$ 、 $2.5D$  ( $D$  は空洞直径) と変化させ、その中で地山が破壊を生じたパターンに対して新設トンネルの深度を変化させるパターンと補強を考慮したパターンを併せ行った(表-2参照)。なお、本研究では空洞内に支保(弾性バネ)を設置することにより空洞の変形挙動に対する補強効果を定性的に把握す

る。図-5にモデル化した補強を示す。

補強のモデル化では、伸縮が可能にするため上下に二分割したアクリル管に弾性バネを装填した。

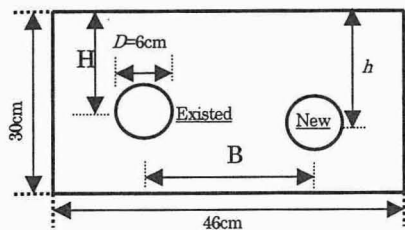


図-4 連続性地盤モデル

表-1 模型と地盤の力学的特性

	モデル	原地盤
$\rho(\text{g/cm}^3)$	2.0	2.5
$\sigma(\text{MPa})$	0.138	0.756
$c(\text{MPa})$	0.049	0.268
$\phi(\text{deg.})$	32	32
$E(\text{MPa})$	11.25	61.54

表-2 実験パターン

実験名称	中心間距離 $B$	深さ比 $h/H$	補強の有無
H15D	$1.5D$	1.0	無
H20D	$2.0D$	1.0	無
H25D	$2.5D$	1.0	無
A15D	$1.5D$	0.6	無
B15D	$1.5D$	1.4	無
PH15D	$1.5D$	1.0	有
PB15D	$1.5D$	1.4	有

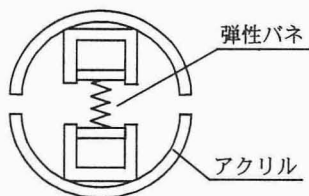


図-5 補強のモデル化

4. 実験結果と考察

写真-1に、空洞の深さ比を $h/H=1.0$ 一定とし、中心間距離のみを変化させた場合の亀裂の進展状況を示し、図-6に空洞直上レベルでの沈下量を示す。図-6を見て分かるように、空洞の中心間距離による相互の影響度合いが相当に違うことがわかる。(a)H15Dでは、両空洞に

多数の亀裂が生じ、ピラー部にも両空洞をつなぎあわせる亀裂が生じピラー部は完全に破壊した。これに対し、(b)H20D、(c)H25Dでは相互の影響はほとんど見られず、ピラー部や両空洞周辺に亀裂はあまり見られず安定であった。沈下量もH20D、H25Dの場合は安定しているため沈下は小さいが、H15Dの場合はピラー部の

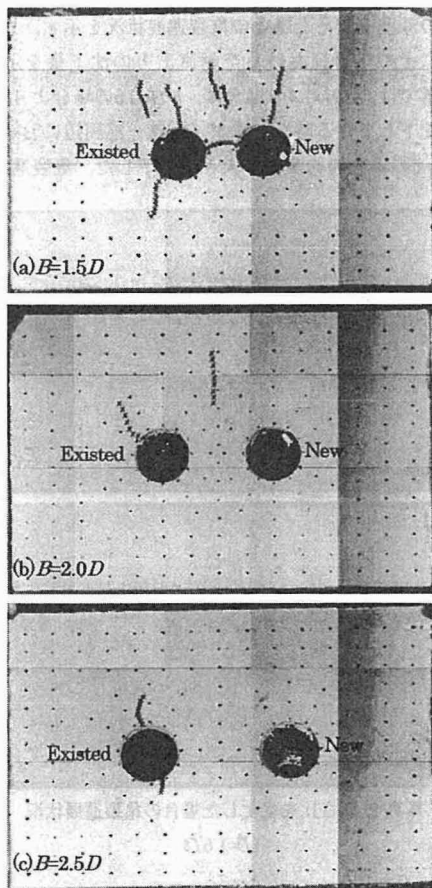


写真-1 空洞周辺の亀裂進展状況 ( $h/H=1.0, B/D$ 変化)

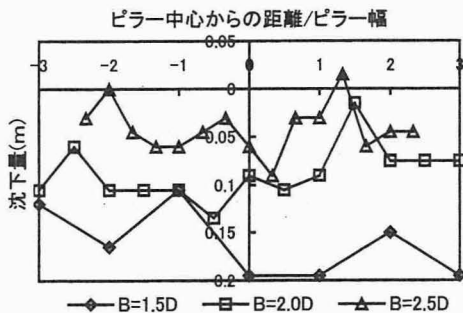


図-6 空洞直上での沈下量 ( $h/H=1.0$ )

破壊により大きな沈下が見られる。特に、ピラー部(−0.5<(ピラー中心からの距離/ピラー幅)<0.5)での沈下量が大きく、H20D, H25Dの約2倍沈下している。以上より、空洞の中心間距離が2.0Dより小さければ、空洞が相互に影響し、空洞周辺地山は不安定になることがわかる。

写真-2に、空洞の中心間距離 $B=1.5D$ と一定にし、新設空洞の深度を変えた場合の亀裂進展状況を示す。また、図-7にその場合における空洞直上方の沈下量を示す。沈下量では、 $h/H=1.4$ の場合は、 $h/H=0.6$ の場合よりも小さく沈下している時もあるが、ピラー部周辺において、 $h/H=0.6$ の場合の約3倍と大きく沈下した。亀裂進展状

況から判断して $h/H=0.6$ の場合は既設、新設ともに空洞周辺の地山が安定しているといえる。また、亀裂進展状況においても、 $h/H=1.4$ の場合は、ピラー部を除く場所での沈下量は $h/H=0.6$ の場合とあまり変わらないが、両空洞の深度が等しい場合と同様にピラー部や既設空洞周辺に多数の亀裂が生じ、ピラー部は完全に破壊した。以上より、既設空洞よりも新設空洞を上部に掘削した場合は、相互の影響を受けにくく空洞周辺地山は安定しているが、下部に掘削した場合は相互の影響を受けやすく、周辺地山は不安定であることがわかる。

写真-3はH15D, B15Dにおいて、補強を考慮した空洞の亀裂進展状況を示し、図-8に空洞直上方の沈下量を

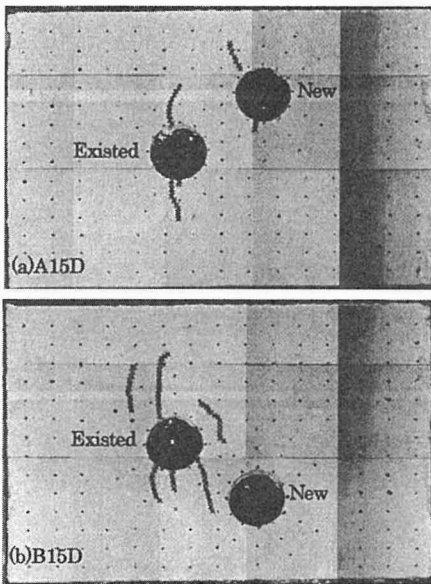


写真-2 深さ比を変化した場合の亀裂進展状況 ( $B=1.5D$ )

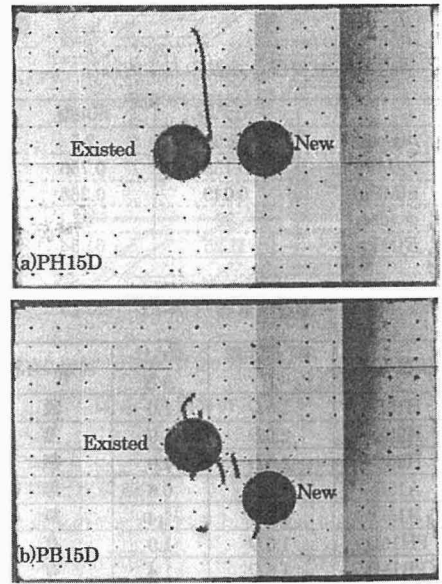


写真-3 補強を行った場合の亀裂進展状況 ( $B=1.5D$ )

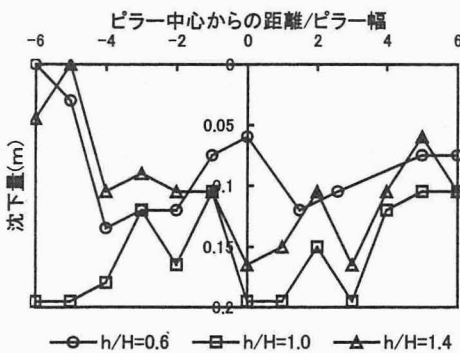


図-7 空洞直上方の沈下量 ( $B=1.5D$ )

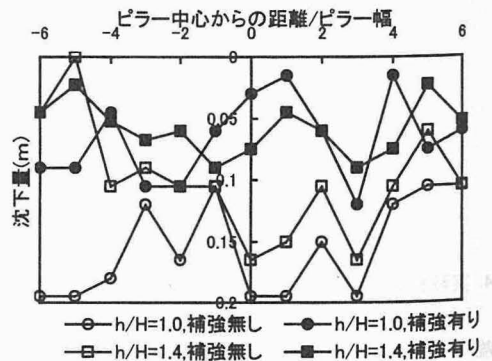


図-8 空洞直上方の沈下量 (補強効果)

示す。いずれも沈下量は相当に抑制され補強効果は十分に表れている。しかし、PH15Dは、ピラー部に亀裂が見られず安定していることがわかるが、それに対しPB15Dでは、PH15Dほどの沈下の抑制も見られず、また、依然として両空洞周辺やピラー部に亀裂が生じているため安定しているとは言い難い。以上より、補強による変形に対する抑制効果が顕著に現れるのは両空洞が同深度の場合であることがわかる。

## 5. 結論

本研究では、両空洞の中心間距離、深度、補強の有無による近接空洞の相互影響の評価を目的として実験的検討を実施した。その結果、下記の知見が得られた。

- ① 亀裂進展領域がピラー部に分布している場合、相互の影響が大きく、空洞周辺地山は不安定となる。なお本実験において、両空洞が同深度ならば中心間距離を2.0Dまで近接させることが可能であった。
- ② 既設空洞よりも新設空洞を上部に掘削した場合はピラー部の亀裂進展領域領域の分布は小さく相互の影響はあまり見られないが、下部に掘削した場合はピラー部に広範囲で分布し、空洞周辺地山は不安定となる。
- ③ 補強効果においては、並列して近接施工した場合は変形に対する抑制効果が見られたが、既設空洞よりも新設空洞を下部に掘削した場合はあまり効果が見られなかった。

補強を考慮した場合の実験は、定性的な実験に止まり、空洞に作用する荷重および補強による空洞の変形量など定量的に把握する必要があるため、今後は補強による変形に対する抑制効果を様々な地山条件で調べる必要があり、それに基づいて、近接施工の合理的な支保設計についてさらに検討を続けていく。

## 謝辞

本研究の実施にあたり、平成11年度長崎大学教育改善推進費(学長裁量経費)の補助を得た。ここに記して、感謝を申し上げます。

## 参考文献

- 1) 土木学会編：トンネル標準示方書(山岳編)，1986。
- 2) 蔣 宇静，江崎哲郎他：近接トンネルの相互影響の評価について，トンネル工学研究論文・報告集，土木学会，Vol. 6，pp. 1-8，1996。
- 3) 西田・江崎・亀田・中川：九大生産科学研究報告，第74号，pp.17-24，1993。
- 4) 蔣 宇静，江崎哲郎，三谷泰浩：底面摩擦模型実験

による地下空洞の安定評価，地盤工学会誌「土と基礎」，Vol.46，No.6，pp.21-25，1998。