

# 小型応力測定装置の移動床実験への適用と その力学的挙動に関する研究

Development of stress measurement system  
and its application for evaluating mechanical behavior of trap door test

杉本知史<sup>1</sup>・落合英俊<sup>2</sup>・安福規之<sup>3</sup>・川村顕大<sup>4</sup>

Satoshi Sugimoto, Hidetoshi Ochiai, Noriyuki Yasufuku and Akihiro Kawamura

<sup>1</sup>正会員 博(工) 長崎大学助手 工学部社会開発工学科 (〒852-8521 長崎市文教町1-14)

E-mail:sugimoto@civil.nagasaki-u.ac.jp

<sup>2</sup>フェロー会員 工博 九州大学大学院教授 工学研究院建設デザイン部門

(〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1) E-mail:ochiai@civil.kyushu-u.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 工博 九州大学大学院助教授 工学研究院建設デザイン部門

E-mail:yasufuku@civil.kyushu-u.ac.jp

<sup>4</sup>非会員 修(工) 国土交通省 大臣官房技術調査課 (〒100-0013 東京都千代田区霞ヶ関2-1-3)

In this paper, the mechanical behavior of the trap door test is estimated from stress changes and displacement in the ground. In order to measure the stress in the model ground, the author developed a new device of measuring stress. On the other hand, a simple formula is proposed to calculate the distribution of the earth pressure around the trap door by following Terzaghi's theory on the loosened earth pressure. The formula is considered slip line which is estimated by the vertical stress changes in the model ground. It is compared and examined through the data obtained by the trap door experiment as well as the DEM analysis. It is considered that the proposed formula gives an important idea about the earth pressure around the cavity.

**Key Words :** underground cavity, re-distribution earth pressure, stress measuring system

## 1. はじめに

一層過密化の進展する都市部では、地下空間の有効利用が求められており、地下空洞の施工による利用の高度化が進められている。このような地下空洞に対して、内空変位や相対的な浮き上がりに伴う周辺地盤内の力学挙動を把握することは、安全性や経済性、維持管理の観点からも重要である。これまで室内実験レベルでは、異径アルミニウム丸棒や乾燥砂を模型地盤材料とした降下床実験あるいは上昇床実験（以下総称して「移動床実験」と呼ぶ）が行われてきている。その多くは地下構造物上に作用する鉛直土圧を推定することを目的とした、境界面上における土圧計測が中心である。例えば足立ら<sup>1),2)</sup>は、降下床を用いた模型実験でトンネルの掘削過程を考慮した場合の周辺地盤の力学的挙動を明らかにして

いる。また福本ら<sup>3)</sup>、平井ら<sup>4)</sup>は、複数の降下床を備えた実験土槽とアルミ棒積層体を用いて、近接施工における地山の応力再配分をシミュレートした二次元模型実験を行い、地下構造物の近接度とそれらに作用する土圧との関係を明らかにしている。上述の研究が対象とした状況において、地盤内応力の分布は対象とされていないが、例えば近接施工における周辺構造物への影響範囲やその程度を推定する上では、地盤内応力の変化は重要な力学的諸量の一つであると言える。これを明らかにすることは重要であると考えられる。そこで本研究では、新たに小型応力測定装置を開発し、さらに移動床実験に対し模型地盤内の応力変化を定量的に測定する方法を適用した模型実験を行った。さらにこの実験結果に基づき、地盤内応力変化の視点から周辺地盤の力学挙動を明らかにした上で、理論的考察の妥当性を検討した。

## 2. 小型応力測定装置を適用した模型実験

### (1) 小型応力測定装置(応力計)の開発

本研究では、2次元アルミ棒積層体を模型地盤とした移動床実験を行うにあたり、地盤内の応力変化を計測する新たな手法を要した。そこで図-1に示す小型応力測定装置(以下、応力計と称す)を開発した。模型地盤材料には、直径1.0mmと1.6mmの異径アルミニウム丸棒を重量比で3:2の割合で混合したものを用いている。模型地盤内の応力計測のためには、極めて小さな応力変化を計測する必要があることから、剛な棒に2つの円盤状のゴム板(硬度70)を固定し、ゴム板側面でアルミ棒積層体と接触させる構造とした。ゴム板断面には市販の3軸型ロゼットゲージ(東京測器製 FRA-1-11-1L)を接着剤で貼付し、ゴム板の3方向のひずみを直接測定する構造としている。これら3方向のひずみ $\varepsilon_a$ 、 $\varepsilon_b$ 、 $\varepsilon_c$ から図-2のようなMohrのひずみ円を描き、さらにゴム板断面上では平面応力状態かつ弾性状態が保たれていることを仮定することにより、任意方向の応力を算定する<sup>5)</sup>。

### (2) 小型応力測定装置(応力計)の特性

剛な載荷板を介して水平・鉛直荷重を載荷可能な図-3に示す二軸等方圧縮試験装置を用いて応力計の特性把握を行った。積層体中央部には応力計を埋設し、等方応力状態となるような所定の荷重を載荷し、さらに除荷を行った。図-4は、同仕様の3つの応力計について行った試験結果である。この結果において、載荷板外部に設置したロードセルと埋設した応力計の関係を見ると、載荷過程では線形関係、除荷過程では最大荷重が載荷された状態を頂点とす

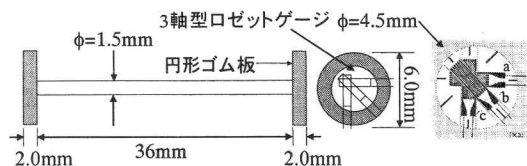


図-1 小型応力測定装置模式図

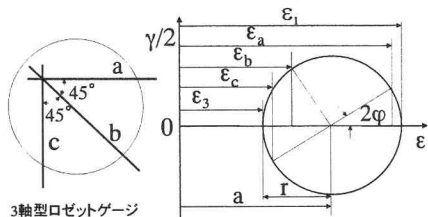


図-2 Mohrのひずみ円

る二次放物線に近似することができる。ただし応力計に固有の材料定数を決定することができなかったため、後述する移動床実験では、初期に土被り圧が応力計に作用していると仮定し、ヤング率・ポアソン比を与えた。また試験中に起こり得る応力計の回転は無視し得る程度であるものとして、本節で得られた近似曲線で測定値の補正を行っている。以下の実験でも、同様の仮定に基づいて計測を行っている。

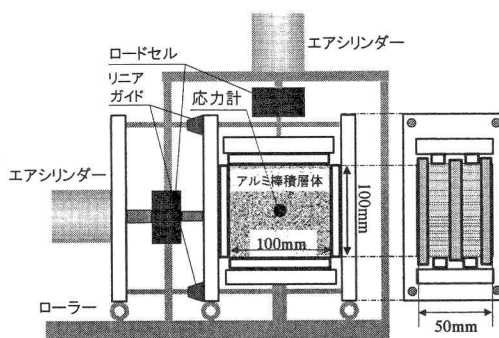
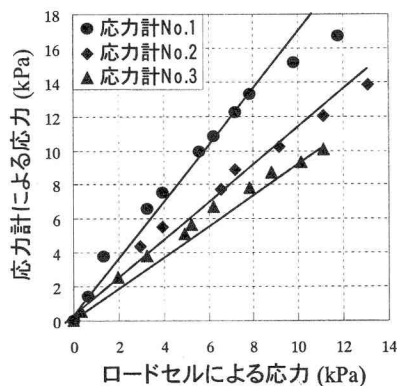
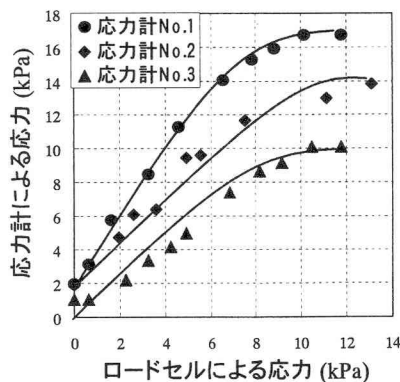


図-3 二軸等方圧縮試験装置



(a) 載荷過程



(b) 除荷過程

図-4 二軸等方圧縮試験

(3) 小型応力測定装置(応力計)を用いた移動床実験  
ならびにDEM解析の概要

応力計および画像解析装置を用い、図-5 に示す移動床実験を行った。この実験は移動床を下降・上昇させることで、地下空洞の内空変位・相対的な浮き上がりを再現するものである。土盛り高さ  $H$  は 300,500,700mm の 3 ケースについて実施し、図-5 では  $H=500$  mm の場合について示す。この装置底部には 17 基の荷重計が装備されており、装置中央 3 基の荷重計が移動床(幅  $2B=100\text{mm}$ )である。実験ではこの移動床を  $1\text{mm}/\text{min}$  で  $5\text{mm}$  下降・上昇させた。応力計の埋設位置については、土槽底部から鉛直方向に  $50\text{mm}$  間隔で  $400\text{mm}$  高さの位置まで、またそれぞれ土槽中央(C.L.)から  $35\text{mm}$  間隔で 6 個ずつ埋設した。さらに同条件で数回にわたって、繰り返し地盤内応力を測定し、その平均値を用いて考察を行った。

次に移動床実験を模擬した DEM 解析を行った。表-1 に既往の計算例<sup>9)</sup>を参考にして決定した解析条件を示す。移動床の幅や移動量、土盛り高さ  $H$  は実験と同様である。なお解析には PFC2D(Itasca 社)<sup>6)</sup>を用いた。

(4) 移動床実験における地盤内の力学挙動の推定

a. 移動床実験における地盤内応力変化

図-6、図-7 は、移動床降下・上昇時の地盤内応力変化の分布を示している。鉛直応力変化については、移動床降下時および上昇時ともに実験結果と解析結果に関して良い対応が見られ、鉛直応力の増加・減少が起こる領域がそれぞれ視覚的に明確になった。また、図-6 に示す水平応力分布では、実験

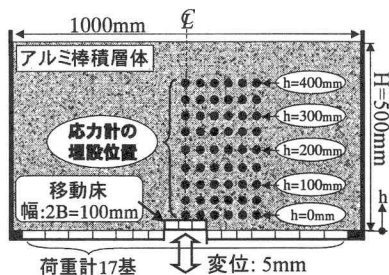


図-5 移動床実験模式図

表-1 解析条件( $H=500\text{mm}$  のケース)

|                                |                                            |
|--------------------------------|--------------------------------------------|
| 土槽サイズ: 幅×高さ(mm)                | 900×500                                    |
| 粒径(mm)                         | 3~4.8                                      |
| 粒子数                            | 31000                                      |
| バネ定数(N/m)                      | 法線方向 $K_n$ 1.00E+08<br>接線方向 $K_s$ 5.00E+07 |
| 粒子間摩擦係数                        | 0.5                                        |
| 粒子密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) | 2130                                       |

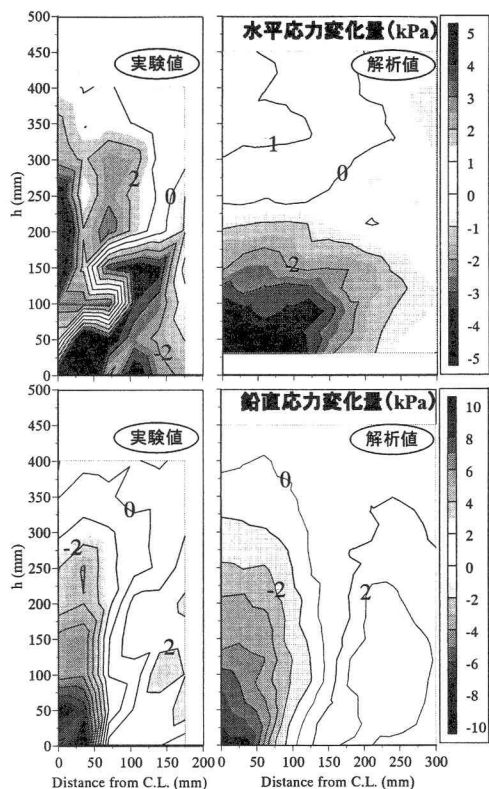


図-6 地盤内応力分布図(降下床)

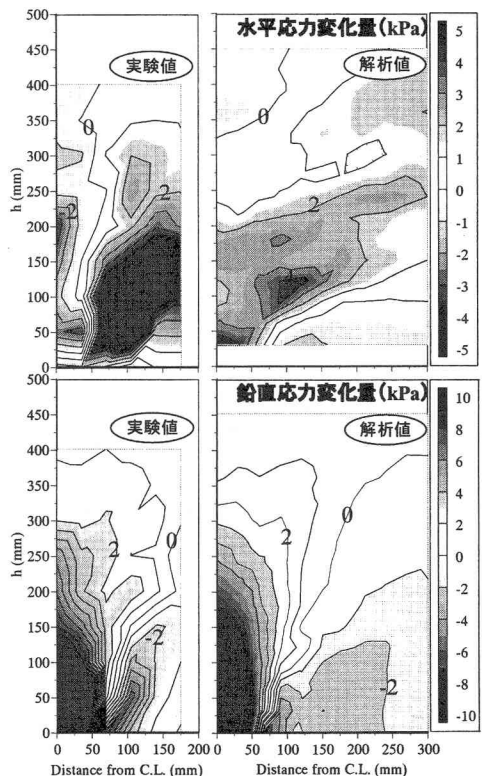


図-7 地盤内応力分布図(上昇床)

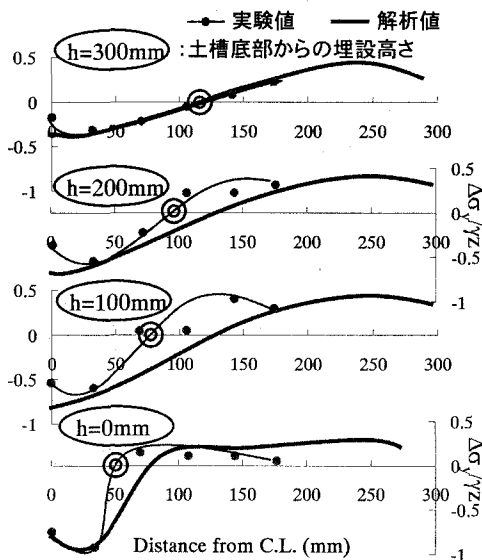
結果において、アーチ効果によって生じると考えられる水平応力増加の領域が  $h=200\text{mm}$  前後に、明確に現れている。また図-7 の水平応力分布からは、水平応力が広く増加する領域があり、側方へ押し広げる力が卓越していると考えられる。

#### b. 鉛直応力変化から推定されるすべり線

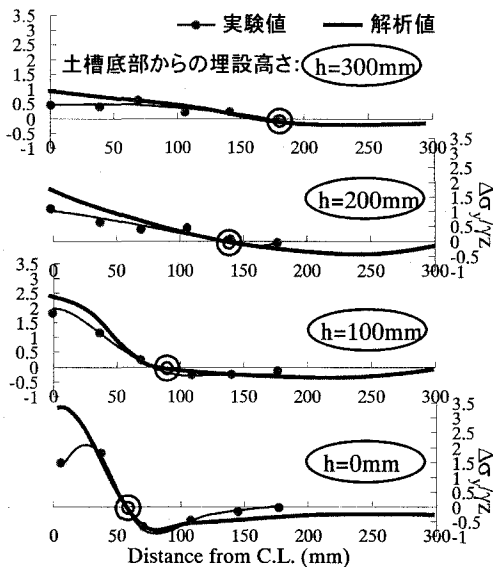
図-8は土槽底部からの埋設高さ( $h=0\sim 400\text{mm}$ )における正規化鉛直応力変化( $\Delta\sigma_y/\sigma_0, \sigma_0=\gamma z$ )であり、太い実線が解析値、プロットおよび細い実線が実験値と

なっている。実験・解析値とも移動床直上から鉛直方向に離れる( $h$ が大きくなる)に従って、鉛直応力の変化量 $\Delta\sigma_y/\gamma z$ は減少傾向にある。また図-8の実験値において応力の増加と減少が転じる位置を◎で示したが、このような位置は地盤内のすべりによって起こる応力の不連続面に相当すると推測される。本来はすべり面に働くせん断応力によって大きな応力変化を示す位置であると考えられる。

また、この◎(図-8)の位置は、図-9に示した変位ベクトル(実験値)から推定されるすべり線と

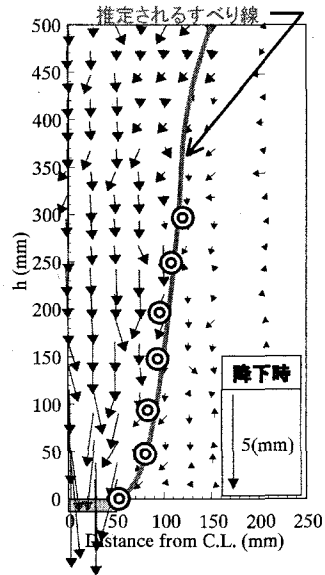


(a) 降下床実験結果

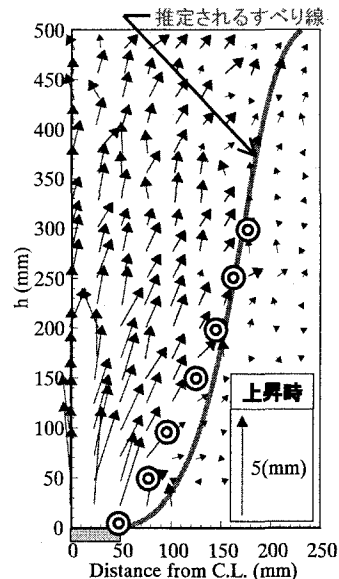


(b) 上昇床実験結果

図-8 鉛直土圧変化



(a) 降下床実験結果



(b) 上昇床実験結果

図-9 変位ベクトル図

良く一致することがわかる。ここで、変位ベクトル長は20倍されており、変位量0.5mmの平滑化した境界線を太線で表示している。同様に解析値においても、◎に相当する位置は、解析結果の変位ベクトルから推定されるすべり線と良く一致した。また、実験・解析とも移動床降下時と比較して上昇時におけるすべり線の傾きが大きいことが確認されている。これは、移動床上昇時には鉛直方向だけでなく側方への押し広げ力が卓越することによる影響が大きいものと考えられる。

#### c. 移動床降下時におけるアーチ作用とゆるみ領域

図-10 は解析により得られた粒子間の接触力分布を左側に、実験で得られた主応力分布を右側に示している。解析結果の黒線は粒子間の接触力の方向を、太さはその大きさを表している。図-10(a)からは、移動床降下時における粒状体特有のアーチ効果と考えられる地盤内の力の伝達が明確に現れている。また、主応力の大きさに着目すると、移動床上から  $h=100\text{mm}$  程度までの領域では、主応力の値自体が小さく、移動床上  $h=100\sim 200\text{mm}$  前後の主応力の大きさと比較してアーチ効果があまり発現していないことがわかる。図-11 に DEM 解析における間隙比の変化量を示しているが、土被り高さ  $H$  にかかわらず、移動床上から  $h=100\sim 150\text{mm}$  までにおいて間隙が大きくなる領域が観察された(図-11(a)参照)。これを本研究ではゆるみ領域と称しており、この領域の高さ(ゆるみ高さ)は土被り高さによって浅い場合を除き、土被り高さによらず移動床幅  $2B$  により決定されるというような結果を得た。

#### d. 移動床上昇時における力学挙動

図-7の水平応力変化では水平応力が大きく増加する領域を確認したが、図-10(b)において、移動床上は鉛直方向へ力が卓越し、さらに側方へと押し広

げる力の伝達を視覚的に確認できている。また図-11(b)からは、すべり線が生じる位置において間隙の変化が非常に大きくなることがわかった。これは、地盤内のせん断過程で生じる粒子の乗り上がりによるものと考えられる。

### 3. すべり線の傾きを考慮した土圧推定法

移動床実験における地盤内応力を理論的に推定する方法として、いわゆるゆるみ土圧を推定することができる Terzaghi の土圧理論<sup>7)</sup>が有名である。この考え方は、実際に「鉄道構造物等設計標準・同解説」等でも用いられているため、この方法を参考に杉本<sup>8)</sup>は降下床モデルを対象とした地盤内応力の推定法を提案した。一方、上昇床のケースでは先に示した実験結果からも明らかのように、地盤内に形

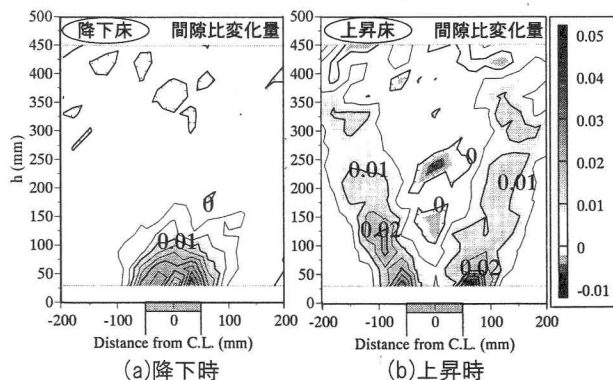
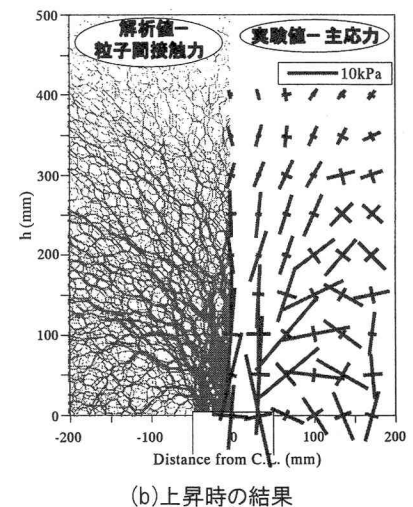
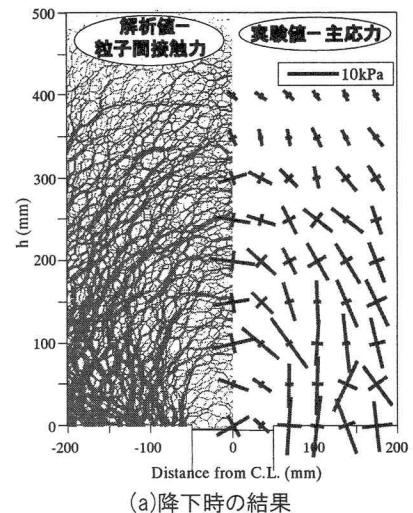


図-11 DEM 解析による地盤内の間隙比変化量分布の比較

図-10 力の伝達に関する実験と計算の比較

成され得るすべり面の傾斜が無視し得ない大きさであることから、新たに図-12に示すすべり線の傾きを考慮した上昇床モデルにおける地盤内応力の推定法を提案する。ここでは便宜的に、すべり面の傾斜を考慮しないモデルをTerzaghiモデルと称する。すべり面上において、Mohr-Coulombの破壊基準を適用すると、すべり面に働くせん断応力 $\tau$ と垂直応力 $\sigma'$ は、

$$\tau = c + 1/2 \{ (1+K_h) - (1-K_h) \sin \phi' \} \sigma_v' \tan \phi',$$

$$\sigma_v' = 1/2 \{ (1+K_h) - (1-K_h) \sin \phi' \} \sigma_v' \cot \alpha, \quad K_h = \sigma_v' / \sigma_h'$$

で表される。これらの値を用いて、 $z$  方向の力の釣り合いをたて、微分方程式を解くと、

$$\sigma_v' = \frac{\gamma \tan \alpha}{K'' \tan \alpha + 1} \left\{ \frac{(H \cot \alpha + B)^{K'' \tan \alpha + 1}}{(z \cot \alpha + B)^{K'' \tan \alpha}} - (z \cot \alpha + B) \right\} + \frac{c}{K''} \left\{ \frac{(H \cot \alpha + B)^{K'' \tan \alpha}}{(z \cot \alpha + B)^{K'' \tan \alpha}} - 1 \right\}$$

となる。ただし、

$$K'' = 1/2 \{ (1+K_h) - (1-K_h) \sin \phi' \} \cdot \{ \tan \phi' - \cot(\pi/4 + \phi'/2) \} + \cot \alpha$$

図-13は、土被り高さ $H$ と上昇床上における正規化した鉛直応力変化の関係を示しているが、 $H$ が大きくなると、Terzaghiモデルでは指数関数的に鉛直応力変化が大きくなるが、提案式（すべり線の傾き $\alpha = \beta = 45^\circ + \phi'/2 = 55^\circ$ とした）では実験結果と同様の傾向が表現できる。特に $K_h = 0.5$ とした場合、実験結果とよく一致しており、すべり線の傾きを考慮すれば、より明確に地盤内応力の変化を推定できるものと考えられる。

#### 4. 結論

本研究ではアルミ棒積層体内の応力変化を測定するための装置を開発し、移動床実験への適用性を確認した。まず、移動床実験においてすべり線を境界として、地盤内の鉛直応力変化が異なると考えられるため、鉛直応力変化の視点からすべり線が推定可能であることを示した。また移動床降下時においては、移動床上かつ $h=100\text{mm}$ 程度までの領域では比較的主応力が小さくなり、間隙が増加することから、ゆるみ領域の存在を明らかにした。さらに移動床上かつ $h=200\text{mm}$ 前後では、アーチ効果の卓越する領域を視覚的に確認した。上昇時においては、鉛直方向だけではなく、水平方向へも力が卓越し、降下時と比較してすべり線の傾きが大きくなることを確認した。最後に、すべり線の傾きを考慮した土圧推定法を提案し、従来の考え方と比較してより精度良い結果を得ることを確認した。

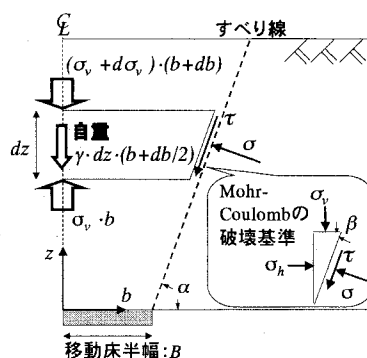


図-12 すべり線の傾きを考慮したモデル化

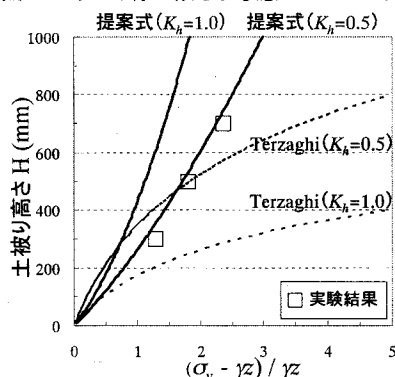


図-13 すべり線傾斜の有無の比較

#### 参考文献

- 1) 足立紀尚, 木村亮, 岸田潔, 伊藤浩志: 降下床実験によるトンネル掘削過程を考慮したトンネルおよび周辺地盤の力学挙動の解明, 土木学会論文集, 第694号/Ⅲ-57, pp.277-296, 2001.
- 2) 足立紀尚, 田村武, 八嶋厚, 上野洋: 砂質地山トンネルの挙動と解析に関する研究, 土木学会論文集, 第385号/Ⅲ-3, pp.129-136, 1985.
- 3) 福本忠浩, 藤井義文, 平井卓, 西村和夫, 小笠原文政: 4連降下床実験による応力再配分のメカニズムに関する提案, 第33回地盤工学研究発表会講演集, pp.1961-1962, 1998.
- 4) 平井卓, 福本忠浩, 西村和夫: 併設トンネルにおけるゆるみ土圧の簡易推定手法の開発, 第35回地盤工学研究発表会講演集, pp.2107-2108, 2000.
- 5) 渡辺理: ひずみゲージとその応用, 日刊工業新聞社, pp.240-249, 1968.
- 6) Itasca: PFC2D ver2.0 User's Guide, Itasca, 1999.
- 7) Terzaghi, K.: Theoretical soil mechanics, John Wiley and Sons, New York, pp.66-75, 1943.
- 8) 杉本知史, 落合英俊, 安福規之, 川村顕大: ゆるみ土圧式に基づいた地盤内応力の推定手法の提案, 第40回地盤工学研究発表会講演集, 2005. (投稿中)