

# 既設構造物を考慮した山留め掘削実験と解析

名古屋工業大学大学院 学生会員 新家雅士  
 名古屋工業大学 国際会員 中井照夫、張鋒、檜尾正也、菊本統  
 名古屋工業大学大学院 学生会員 岩田尚之  
 岡山県 正会員 竹井秀貴

## 1. はじめに

都市部の掘削は、周辺構造物に近接した状態で行われており、周辺構造物や施工過程の影響により地盤の変形挙動が大きく異なる。したがって、設計時に施工過程や周辺構造物の影響を適切に予測し、周囲への影響を最小限に抑えるように施工する必要がある。しかし、現在の設計法では施工過程や周辺構造物の影響を適切に考慮しているとはいえない。そこで、本研究では、周辺構造物を考慮した2次元掘削モデル実験を実施し、掘削における施工過程や周辺構造物の影響について検討するとともに、実験に対応する有限要素解析を併せて行い、実験と数値解析による新たな評価手法の確立を目指す。

## 2. 実験・解析概要

### (1) 強制変位実験・解析

#### ① 実験概要

2次元強制変位実験装置の概略図を Fig.1 に示す。幅 50cm、高さ 32cm の実験装置に、地盤材料として長さ 5cm、径が 1.6mm と 3.0mm のアルミ棒を重量比 3 : 2 ( $\gamma_d=20.4\text{kN/m}^3$ ) で混合したものを用いた。実験は、装置右側に設置した3つのスライドブロックを後方に引くことにより掘削時の主働状態を再現した。そして3つのスライドブロックを上から順に step1, step2, step3 と各ブロック最大 4.0mm まで引くモード<sup>1)</sup>を選択した。既設構造物は奥行き 5cm×幅 8cm( $B_f=8\text{cm}$ )のべた基礎を用い、アルミ棒積層体の地表面に設置し、荷重装置による荷重で地盤極限支持力の約 1/3 の荷重を与えることで表現した。地盤の極限支持力実験及び解析結果を Fig.2 に示す。土圧分布は各々のスライドブロックに設置したロードセルにより計測する。また、地表面沈下量はアルミ棒積層体上方のスライドシャフト上を連続的に移動できるレーザー変位計を用いて計測し、同時にスライドブロックからの距離を装置上部に設置した超音波変位計により計測した。また、実験写真から画像編集ソフトを利用し、せん断ひずみ分布を求めた。構造物とスライドブロックの位置関係を Table.1 に示す。構造物なし(Case1)と、山留め壁背面から構造物までの距離が  $L_w=4\text{cm}$  (Case2)、 $L_w=8\text{cm}$  (Case3)、 $L_w=12\text{cm}$  (Case4)の4ケースについて実験を行った。ここに、 $L_w$  は壁体位置と構造物基礎端との水平距離を表す。

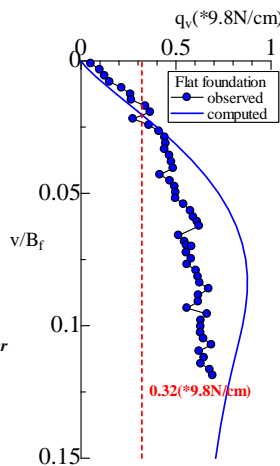
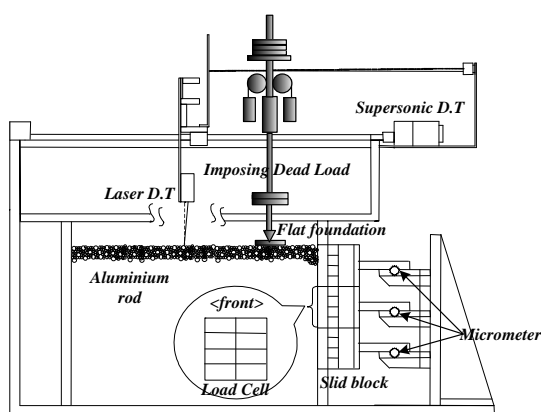


Fig.2 荷重沈下関係

Table.1 強制変位実験ケース

Case1	Case2
Case3	Case4

#### ② 解析概要

Model test and numerical analysis on excavation problem considering existing structures

Niinomi, M., Nakai, T., Zhang, F., Hinokio, M., Kikumoto, M., Iwata, N. and Takei, H. (Nagoya Institute of Technology)

有限要素解析は、密度や拘束応力の影響を考慮できる等方硬化型の弾塑性構成式(subloading  $t_{ij}$  model)<sup>2)</sup>を用いた。要素には4節点のアイソパラメトリック要素を用い、平面ひずみ、微小変形理論、排水条件下で解析を行なった。解析に用いた材料パラメータを Table.2 に示す。地盤の初期応力は単位体積重量 $\gamma=20.4\text{kN/m}^3$ 、初期応力状態  $p=9.8\times 10^{-5}\text{kPa}$  において間隙比  $e$  が 0.328 とし、自重圧密により深さ方向に応力と間隙比が分布するように作成した。境界条件は底面完全固定、側面は鉛直方向のみ自由とし、スライドブロックの移動を強制変位により表現した。荷重を受ける構造物は、solid 要素と中心荷重で表現し、基礎底面には摩擦角 $\delta=18^\circ$ の joint 要素を入れ境界でのすべりを考慮した。2次元解析メッシュ (Case2) を Fig.3 に示す。なお、計算の途中で地盤内の要素に引っ張り領域(tension)が発生した場合にはそれ以後の計算を打ち切っている。

Table.2 解析パラメーター

$\lambda$	0.008	same parameters as Cam-clay model
$\kappa$	0.004	
$N=e_{NC}$ at $p=98\text{kPa}$ & $q=0\text{kPa}$	0.3	
$R_{CS}=(\sigma_1/\sigma_3)_{CS}$	1.8	
$v_e$	0.2	
$\beta$	1.2	shape of yield surface (same as original Cam-clay at $\beta=1$ )
$a$	1300	influence of density and confining pressure

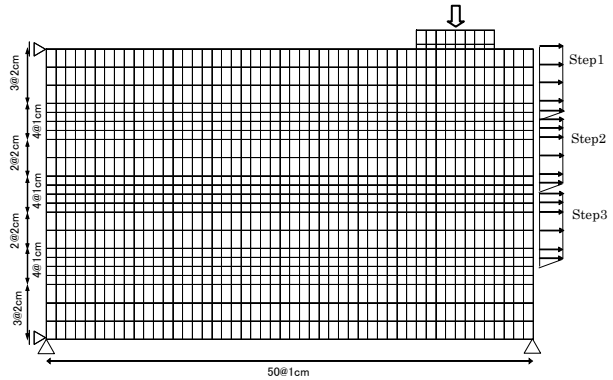


Fig.3 強制変位解析メッシュ (Case2)

(2) 切梁掘削実験・解析

① 実験概要

2次元切梁掘削実験機の概略図を Fig.4 に示す。幅 68cm、高さ 45cm 実験装置に、地盤材料及び構造物は強制変位実験と同じものを用いた。実験は、アルミ棒を取り除き切梁を設置することで切梁掘削を再現した。山留め壁は幅 6cm、高さ  $H_0=30\text{cm}$ 、厚さ 0.5mm のアルミ板を用い、スライドブロックから 20cm の位置に設置した。アルミ板の両面にひずみゲージを貼り付け、掘削時に作用する曲げモーメントを求めた。掘削時のアルミ板の変位は実験写真を元に画像編集ソフトを利用し求めた。

実験は、スライドブロックから 20cm 幅の掘削領域のアルミ棒を高さ 1.5cm ずつ取り除いていき、掘削深さ  $d=3\text{cm}$  に達した所で、深さ 1.5cm 点に一段目の切梁 (バネ定数=13.7kN/m) を挿入し、掘削深さ  $d=9\text{cm}$  に達した所で 7.5cm 点に 2 段目の切梁 (バネ定数=15.7kN/m) を挿入し、最終掘削深さ  $d=15\text{cm}$  とした。切梁軸力はスライドブロックに設置したロードセルにより計測する。また、地表面沈下量の計測は強制変位実験と同じである。Table.3 に示すように、構造物設置位置についても強制変位実験同様 4 つのケースについて実験を行った。実験で使用した材料定数を Table.4 に示す。

Table.3 切梁掘削実験ケース

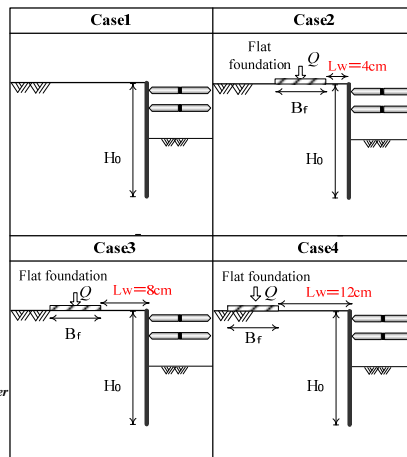


Table.4 実験材料定数表

	実験に用いた各材料定数
地盤材料	アルミ棒 (実験計測値)
	$\gamma=20.4[\text{kN/m}^3]$
山留め壁	アルミ板 (H4000 1050)
	$E=7.03\times 10^7[\text{kN/m}^2]$
	$EI=0.44[\text{kN}\cdot\text{m}^2]$
	$EA=2.11\times 10^3[\text{kN}]$
	$H_0=30.0[\text{cm}]$
切梁	$A=6.00\times 10^{-2}[\text{cm}^2]$
	$I=1.25\times 10^{-5}[\text{cm}^4]$
	$k_1=13.7[\text{kN/m}]$
	$k_2=15.7[\text{kN/m}]$

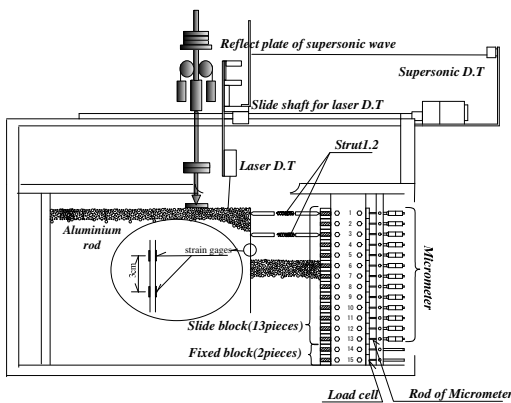


Fig. 4 切梁掘削実験装置

## ②解析概要

切梁掘削解析メッシュ (Case2) を Fig.5 に示す。パラメーター及び初期地盤の作成方法は前に示す強制変位解析と同じである。山留め壁を *beam* 要素、切梁を弾性ばねで表現した。山留め壁と地盤の間のすべりを考慮するため、*beam* 要素と *solid* 要素 (地盤要素) の間に壁面摩擦角 $\delta=14^\circ$  の *joint* 要素を設置している<sup>3)</sup>。壁面から端の要素を、500stepごとに横1段(0.75cm)ずつ削除することで掘削を表現した。強制変位解析と同様に構造物は、*solid* 要素と中心荷重で表現し、基礎底面には壁面摩擦角 $\delta=18^\circ$  の *joint* 要素を入れ底面でのすべりを考慮した。解析で与える各材料定数は、実験材料定数を単位奥行きあたり(1cm)に換算した値を使用している。ここでも、計算の途中で地盤内の要素に引っ張り領域(*tension*)が発生した場合にはそれ以後の計算を打ち切っている。

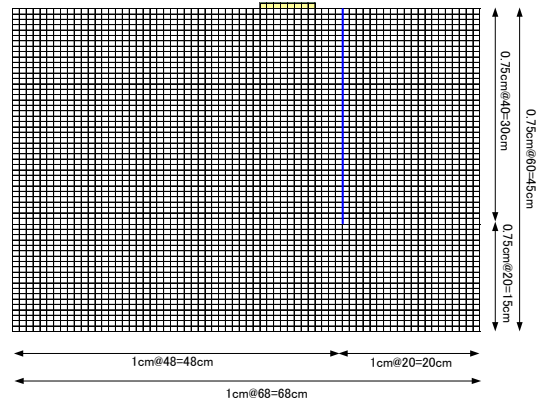


Fig.5 切梁掘削解析メッシュ (Case2)

## 3. 実験及び解析結果

### (1) 強制変位実験・解析

土圧分布を Fig.6 に示す。縦軸は地表面からの深さ、横軸は土圧を表している。実験、解析ともに、既設構造物を設置した Case2~4 は Case1 と比べて、土圧分布は大きくなる。解析では、構造物が山留め壁に近づくにつれ土圧分布は増加する傾向が見られる。

地表面沈下分布を Fig.7 に示す。縦軸は地表面沈下量、横軸はスライドブロックからの距離を表している。実験、解析ともに、既設構造物を設置した Case2~4 は Case1 と比べ壁面近傍の沈下量が小さい。構造物は山留め壁側に傾き、構造物が山留め壁に近づくにつれ構造物の沈下量は増加している。

最終状態におけるせん断ひずみ分布を Fig.8 に示す。Case1 では、せん断ひずみは壁面近傍を中心に発生しているが、Case2~4 では、壁面近傍だけでなく構造物付近にまで広がっている。

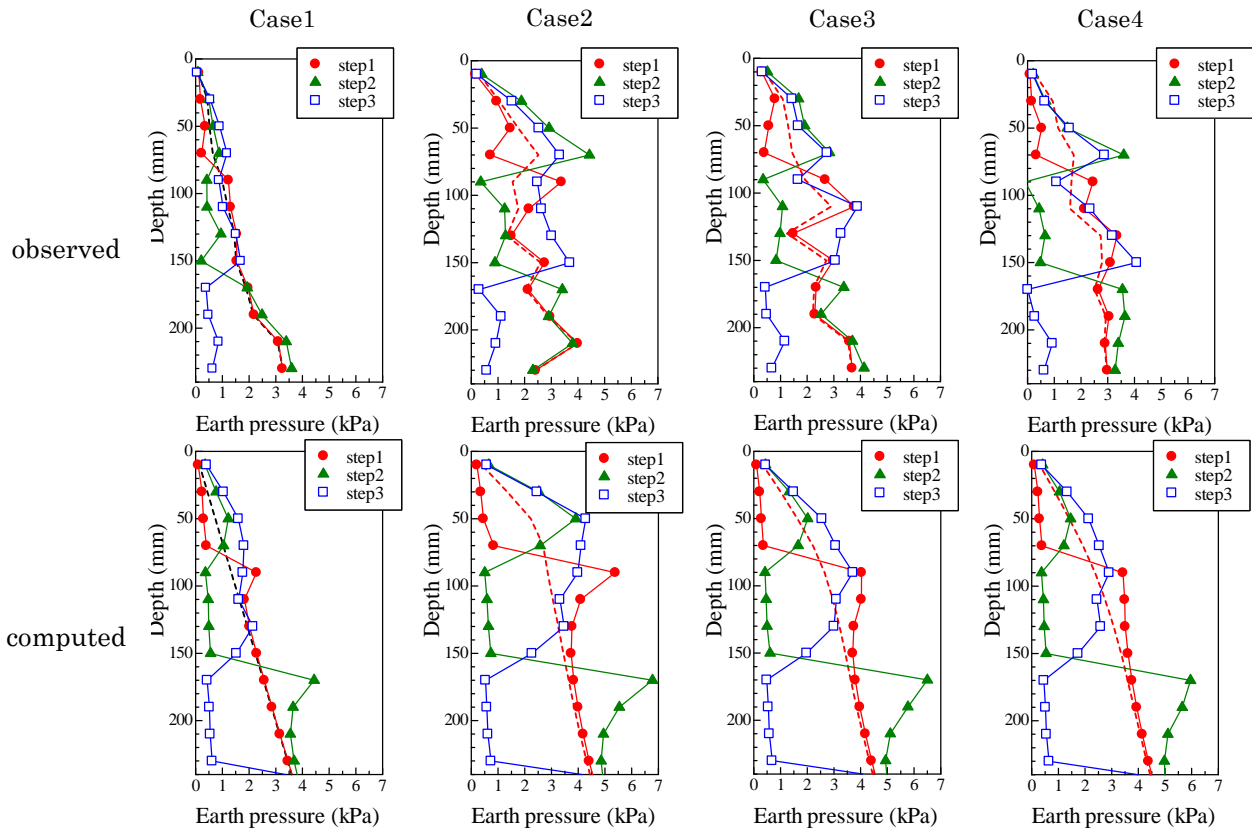


Fig.6 土圧分布の実験と解析による比

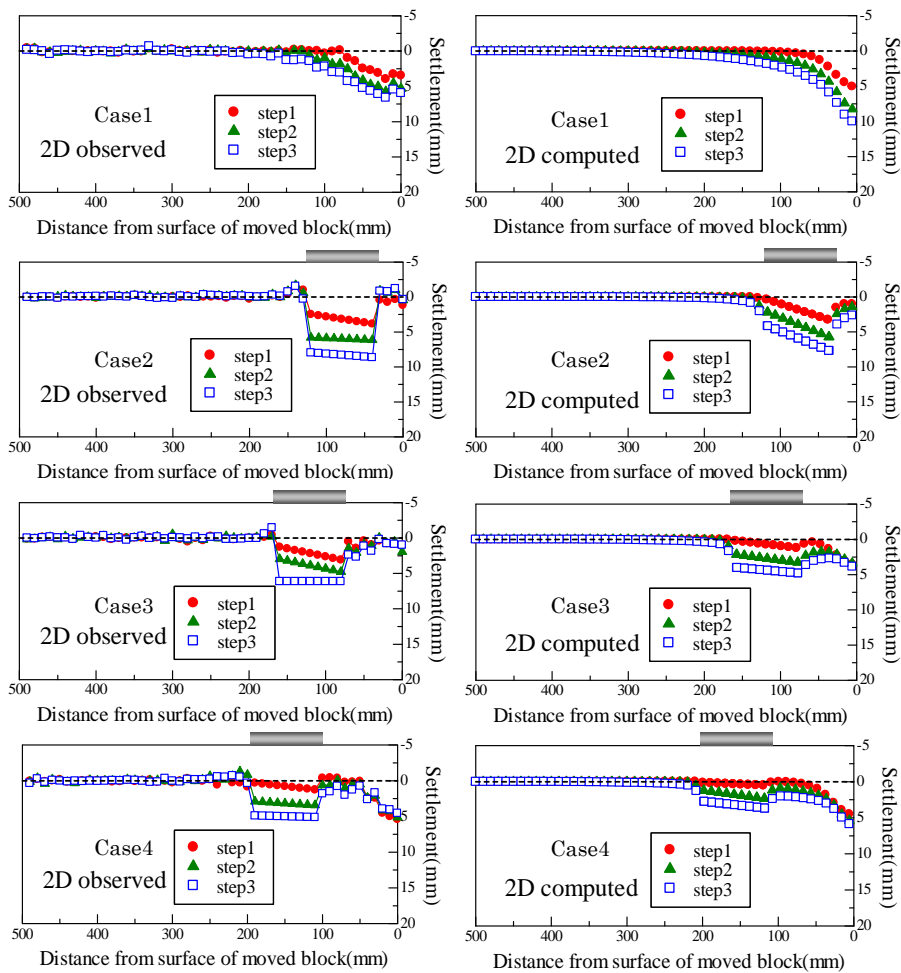


Fig.7 地表面沈下分布の実験と解析による比較

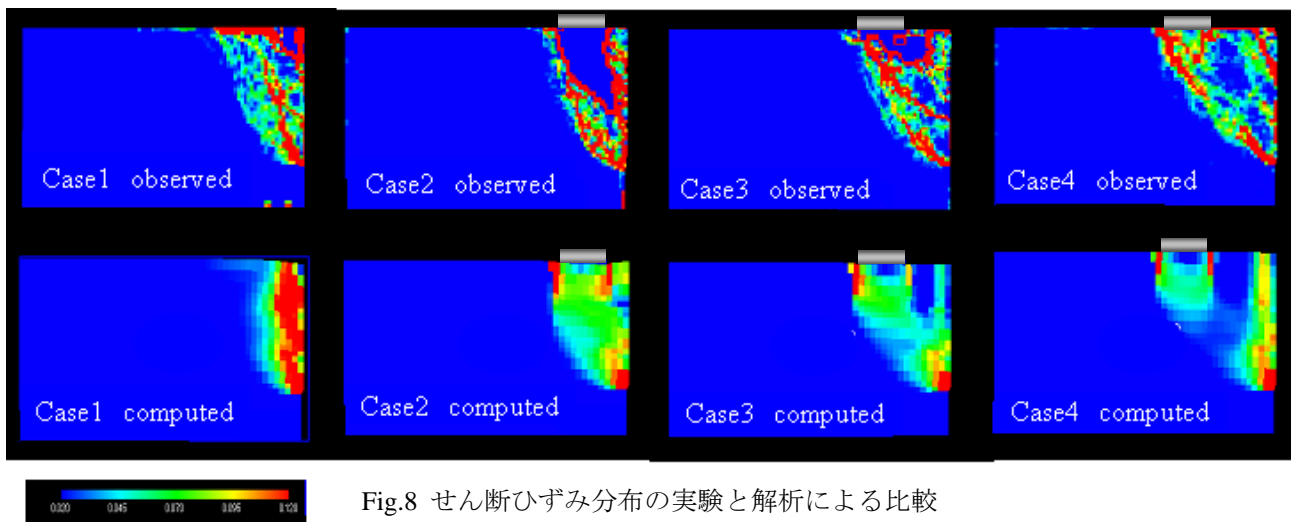


Fig.8 せん断ひずみ分布の実験と解析による比較

## (2) 切梁掘削実験・解析

地表面沈下分布を Fig.9 に示す。縦軸は地表面沈下量、横軸はスライドブロックからの距離を表している。実験、解析ともに、構造物は掘削進行に伴い沈下し、一段目の切梁が挿入されるまでは山留め壁側に傾くが、切梁挿入後は掘削進行に伴い山留め壁と反対側に傾くことがわかる。解析は、実験に比べて沈下量が小さい。強制変位実験・解析結果と同様に、既設構造物を設置した Case2~4 は Case1 と比べ壁面近傍の沈下量が小さいが、全体としての傾向はよい対応をなす。そして、構造物が山留め壁に近づくにつれ構造物の沈下量は増加している。

最終状態（掘削深さ  $d=15\text{cm}$ ）におけるモーメント分布を Fig10 に示す。縦軸は壁面位置 ( $h/H_0$ )、横軸は

モーメントを表している。なお、壁面位置は、壁面下端からの距離(h)を壁体高さで割ったもの ( $h/H_0$ ) で表現している。実験、解析ともに、Case1 と Case2~Case4 を比較して、Case2 において曲げモーメントが特に大きくなる。ここでも解析結果は同様の傾向を示すものの、実験に比べて曲げモーメントの大きさは小さい。

最終状態 (掘削深さ  $d=15\text{cm}$ ) における壁面変位分布を Fig11 に示す。縦軸は壁面位置 ( $h/H_0$ )、横軸は変位量を表している。実験、解析ともに、Case1 と Case2~Case4 を比較して、Case2 において壁面変位量が特に大きくなる。解析は、実験に比べて壁面変位量が小さい。

掘削に伴う切梁軸力の変化を Fig 12 に示す。縦軸は軸力、横軸は壁体高さに対する掘削深さを表している。実験、解析ともに、構造物が山留め壁に近づくにつれ軸力は大きくなり、Strut2 挿入後の Strut1 の軸力は掘削深度の進行に伴い減少する。

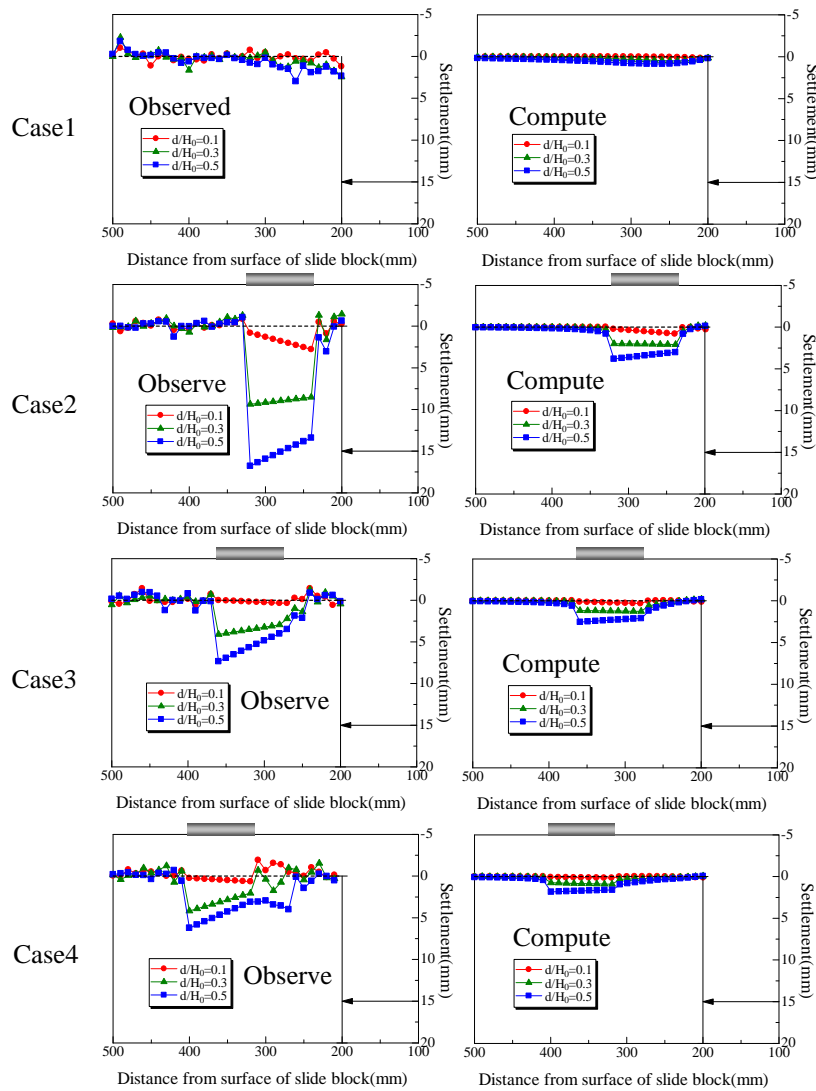


Fig.9 地表面沈下分布の実験と解析による比

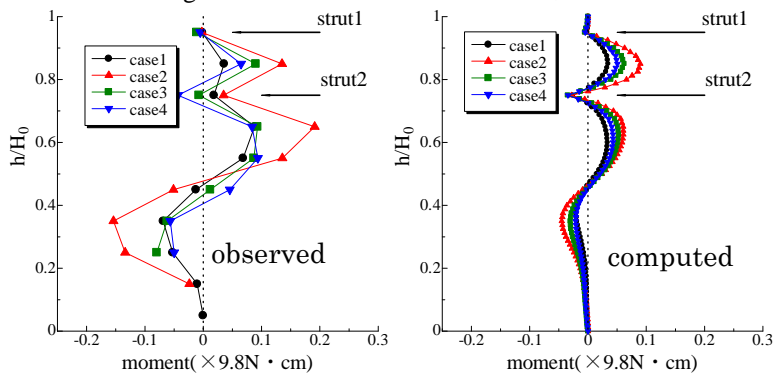


Fig.10 モーメント分布の実験と解析による比較

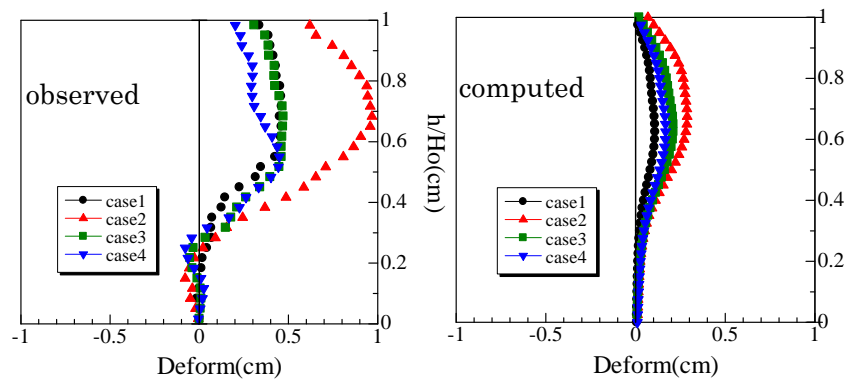


Fig.11 変位分布の実験と解析による比較

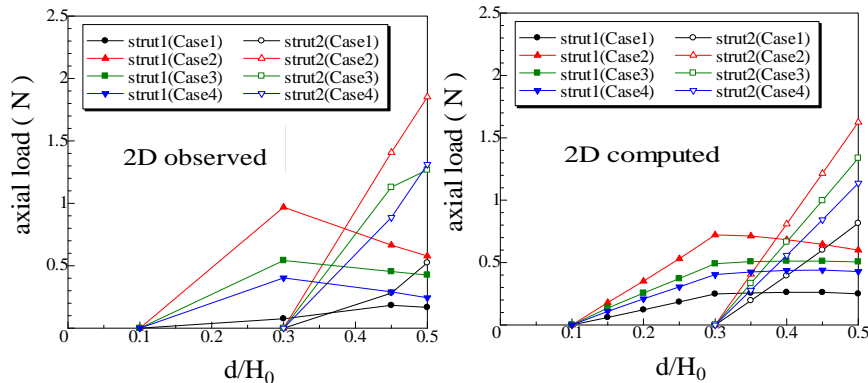


Fig.12 軸力の実験と解析による比較

#### 4. 結論

##### (1) 山留め掘削時における既設構造物の影響について

本実験より、既設構造物に近接して山留め掘削する際に、既設構造物は山留め壁背面地盤、壁面土圧および切梁軸力に大きな影響を及ぼすことがわかった。また、Case2 で見られるように、既設構造物が山留め壁に近いときのみ、山留め壁の変位および山留め壁の曲げモーメントは既設構造物の影響を大きく受けることがわかった。

強制変位実験結果から、既設構造物が存在する Case2~4 の土圧分布は既設構造物の存在しない Case1 よりも大きい。そこで、切梁掘削実験においても、強制変位実験と同様に、既設構造物が存在する Case2~4 の壁面に作用する土圧は Case1 よりも大きいと推測できるが、Case3、4 の山留め壁変位量は Case1 と比べて大きな差は見られず、最も構造物と山留め壁との距離が近い Case2 のみ Case1 と比べて特に差が大きい。通常の山留め設計では、主働土圧を作用させて、その土圧を基に山留め壁変位量等を予測するが、本研究より、ランキン土圧のみで山留め壁変位量を適切に予測することは難しいといえる。従って、山留め設計において既設構造物の影響を適切に考慮することが重要である。

##### (2) FEM 解析を用いた新たな評価手法の確立について

強制変位解析は、土圧分布、地表面沈下分布ともに事前解析で主要な情報を得ることができた。また、強制変位解析は定性的、定量的に実験値とよい対応をなした。境界条件および地盤の材料特性が現場状態を十分に表現できるものであれば、新たな評価手法として利用可能である。

切梁掘削解析では定性的には表現できるが、定量的には検討が必要である。実験・解析結果の軸力比較より、掘削における応力挙動は十分表現できていると考えられる。そこで強制変位実験で定性的、定量的に表現できていることと考え合わせると、検討すべき項目としては、アルミ板との摩擦挙動（特に低応力レベル）の再評価ではないかと考える。

##### 参考文献

- 1) 岩田 尚之ら: 第 40 回地盤工学研究発表会, pp1789-1790, 2005
- 2) Nakai, T. and Hinokio, M.: A SIMPLE ELASTOPLASTIC MODEL FOR NORMALLY AND OVER CONSOLIDATED SOILS WITH UNIFIED MATERIAL PARAMETERS, SOILS AND FOUNDATION, vol.44, No.2, pp.53-70, 2004
- 3) 佐藤 康晴ら: 第 38 回地盤工学研究発表会, pp1655-1656, 2003