

グラウンドアンカーによる山留め支保メカニズムに関する 2 次元モデル実験 (2-dimensional model tests on reinforcing mechanism of braced wall by ground anchors)

加藤盛大¹, 菊本統², 中井照夫³, Hossain Md. Shahin⁴, 上谷泰高⁵

1 名古屋工業大学大学院 社会工学専攻 博士前期課程 1 年

2 名古屋工業大学 都市社会工学科 助教 (E-mail: kikumoto@nitech.ac.jp)

3 名古屋工業大学 都市社会工学科 教授

4 名古屋工業大学 都市社会工学科 准教授

5 鹿島建設株式会社

概 要

地中のアンカー体から反力を得るグラウンドアンカー式山留め掘削工法は、切梁工法に比べて広く任意の断面で掘削できるためしばしば用いられているが、アンカーによる山留め壁の支保機構は必ずしも解明されていない。本研究では、グラウンドアンカー式山留め掘削工法を模擬した 2 次元モデル実験装置を開発し、アンカーの初期緊張力、長さ、角度をパラメトリックに変化させた実験を実施した。その結果、十分な支保効果を得るためには適切な初期緊張力と十分な長さのグラウンドアンカー設置することが肝要であることがわかった。また、下段アンカーの引張力の推移に留意することで山留め壁の安定性に配慮した施工を実現できることが示された。

キーワード：山留め掘削，グラウンドアンカー，模型実験

1. はじめに

地中のアンカー体の引抜抵抗を反力とするグラウンドアンカー式山留め掘削工法は、切梁工法に比べて広く深い断面の掘削が可能であり、掘削法面の形状を任意に設定できることや優れた施工性からしばしば適用されている。しかし、グラウンドアンカーと地盤および山留め壁の相互作用メカニズムやグラウンドアンカーによる山留め壁の補強効果は必ずしも明らかになっていない。

従来、グラウンドアンカーを用いた場合の山留め壁に作用する土圧の設定と山留めの応力・変形計算は切梁式山留め設計法と同様に、弾塑性法や経験的な手法を用いている場合が多い。また、アンカー式山留めではアンカーに緊張力を導入することが原則であるが、緊張力の導入による山留め壁の背面側への変位と土圧の増加を適切に評価する手法は確立されていない⁴⁾。そこで本研究は、アンカーの長さや緊張力など種々の影響要因をパラメトリックに変化させたグラウンドアンカー式山留め掘削の 2 次元模型実験を実施し、効率的な山留め支保効果が得られるグラウンドアンカーの適用方法とその支保メカニズムの検討を行い、現行設計法の合理化を目指すものである。

2. 2 次元模型実験の概要

2.1 アンカー式山留め掘削のモデル化

実験装置の概略図を図 1 に示す。模型寸法は現場スケールの約 1/100 を想定している。地盤材料には直径 1.6 mm と 3.0 mm のアルミ棒を重量比 3 : 2 で混合したアルミ棒積層体 (単位体積重量 $\gamma = 20.4 \text{ kN/m}^3$) を用いた。山留め壁 (長さ 300 mm, 奥行き 60 mm, 厚さ 0.5 mm) とアンカー体 (奥行き 50 mm 横幅 50 mm, 厚さ 5 mm) はアルミ板で作成し、山留め壁の剛性は $EI = 0.88 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{cm}$, $EA = 4.22 \cdot 10^2 \text{ kN/cm}$ である。また、アンカー体はアルミ棒積層体と単位体積重量がほぼ等しくなるように重量を調整してあり、周面には 10 mm 間隔でアルミ棒 (径 1.6 mm) を貼り付けることで地盤との摩擦を表現した (図 2 (a)参照)。アンカー頭部は、図 2 (c) に示すようにシャフト部とヘッド部で構成されており、ヘッド部の蝶ナットでロッドの緊張力を制御した。また、ヘッド部はシャフト軸回りに自由に回転する機構となっており、水平面からのアンカーの傾角 θ を任意に設定できる。アンカーロッドは、アンカー体とアンカー頭部をモデル地盤の両側面からピアノ線 (径 0.3 mm, $EA = 1.41 \cdot 10^3 \text{ kN/cm}$) で接続してモデル化した (図 1 upper side 参照)。ピアノ線の中央部には、2 軸のひずみゲージを接着したアルミ薄板 (長さ 70 mm, 幅 6 mm, 厚さ 0.2 mm) を挿入しており (図 2 (b)参照)、計測したひずみに別途実施

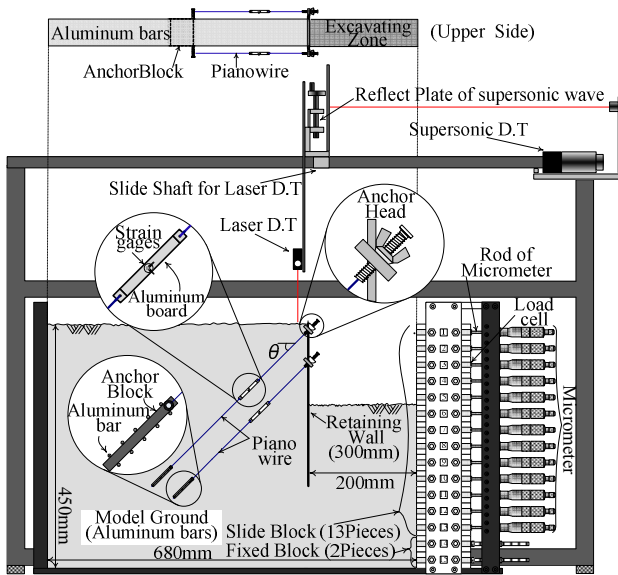
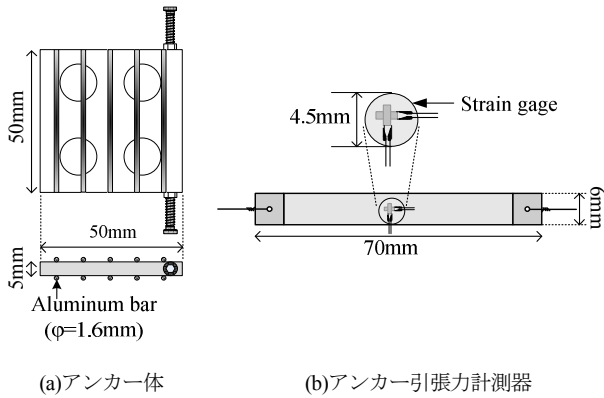
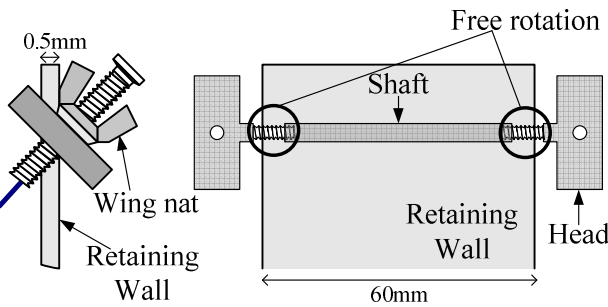


図1 2次元モデル実験装置



(a)アンカー体

(b)アンカー引張力計測器



(c)アンカー頭部

図2 実験に用いた各部材

した張力試験により求めた較正係数を乗ずることでアンカーロッドの引張力を算出した。

実験は、山留め壁とアンカー体はあらかじめ地中に設置した状態で掘削を開始する。掘削過程は地表面からアルミ棒を15mmずつ取り除くことで模擬し、地盤の崩壊によって実験の続行が不可能となる掘削深度まで行った(今回行った実験パターンではいずれも掘削深度 $d=210\text{mm}$ で崩壊)。アンカーは2段設置し、上、下段のアンカーはそれぞれ掘削深度が30mm、90mm到達時に地表面から深さ

表1 実験パターン

	初期緊張力 T (N)	アンカー長 L (mm)	アンカー傾角 θ (°)
Case1	$T_{U0}=0.31, T_{L0}=0.92$	$L_U=300, L_L=250$	45°
Case2	$T_{U0}=0.31, T_{L0}=0.92$	$L_U=150, L_L=125$	45°
Case3	$T_{U0}=0.31, T_{L0}=1.84$	$L_U=300, L_L=250$	45°
Case4	$T_{U0}=0.25, T_{L0}=0.74$	$L_U=300, L_L=250$	30°

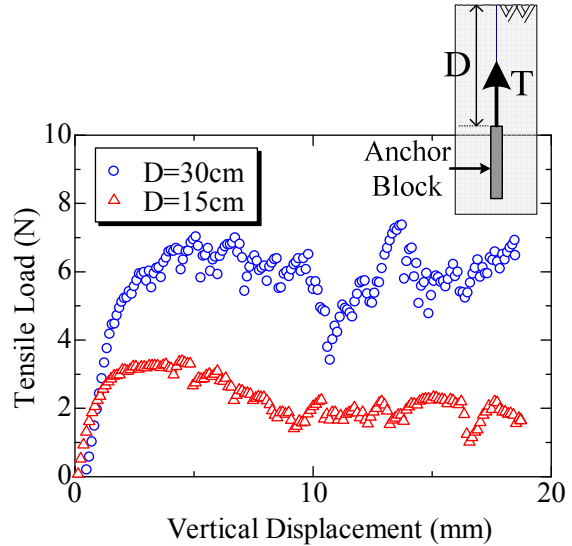


図3 引抜き試験結果

15mm、75mmの位置に設置した。山留め壁の変位は30mm掘削毎に地盤側面から撮影したデジタル画像より求め、地表面の沈下形状はレーザー変位計と超音波変位計を組み合わせた変位形状計測装置により計測した。

実験パターンを表1に示す。 θ はアンカー傾角であり、上段アンカーの初期緊張力を T_{U0} (N)、長さを L_U (mm)、下段アンカーの初期緊張力を T_{L0} (N)、長さを L_L (mm)とした。実験は計4パターン実施し、アンカーの初期緊張力と長さ、角度による差異について検討した。なお、傾角30°でアンカーを設置するCase4では、山留め壁に与える初期水平力(すなわち緊張力の水平成分)がCase1および2と等しくなるようにアンカー初期緊張力を設定している。

2.2 アンカー引抜き試験

グラウンドアンカーによる山留め掘削モデル実験を行うにあたり、モデル化したアンカー体の模型地盤に対する引抜耐力を調べるために、引抜き試験を行った。引抜き試験はモデル地盤中にアンカー体を設置し、鉛直上向きに等速で強制変位を与えた。アンカー体の土被りは、 $D=15, 30\text{cm}$ の場合について行い、得られた引抜き荷重と鉛直変位の関係を図3に示す。図より、アンカー引抜き力は鉛直変位に伴って増加してやがて極限值に達し、漸減する傾向を示す。また、極限引抜き力は土被りが深いほど大きい。このような傾向は、アンカープレートとタイロッドを精緻

にモデル化した Hoshiya and Mandal によるアンカー引抜き試験³⁾でも同様に確認されていることから、本検討ではアンカー体の引抜き特性が適切にモデル化されているものとする。

3. 結果と考察

3.1 アンカー引張力の推移

図 4 に各ケースにおける掘削深度とアンカーの引張力の関係を示す。縦軸にアンカーの引張力、横軸に掘削深度をプロットした。図から、掘削深度 30 および 90mm で上段および下段アンカーに所定の初期緊張力が導入され、掘削の進行に伴って刻々と変化する様子を把握できる。なお、各図にはそれぞれ 2 回実施した実験の結果を示しているが、いずれのケースでも実験の再現性は十分といえる。

図より、アンカー傾角 $\theta=45^\circ$ とした Case1~Case3 では、上段アンカーの引張力は下段アンカー設置まであまり変化しないものの、掘削深度 90mm で下段アンカーの初期緊張力を導入すると明確に減少することがわかる。特に、下段アンカーの初期緊張力が大きい Case3 では上段アンカーの引張力の減少が顕著である。一方、アンカー傾角が小さい Case4 では、上段アンカーの引張力はほとんど変化していないが、これは下段アンカーの初期緊張力が小さいことが理由と考える。

下段アンカーの引張力は、いずれのケースにおいても設置直後には掘削の進行に伴って僅かに減少するものの、その後は引張力が増加に転じ、崩壊時に最大値となることからわかる。最大引張力に着目すると、アンカー傾角 $\theta=45^\circ$ のケースでは下段アンカー長が 300mm の Case1,3 の最大値はほぼ等しく、アンカー長が 150mm の Case2 の 2 倍程度である。また、引張力が増加に転じる掘削深度はケースによって異なり、初期緊張力の大きい Case3 では崩壊直前の $d=180\text{mm}$ から引張力が増加する。なお、アンカー長が短い Case 2 で十分な引抜き抵抗が得られないのは、アンカー体の設置位置が浅く、アンカー体への拘束応力が小さいことや、アンカー体を含む地盤がすべり破壊を生じることが原因と考える。以上の結果から、周辺地盤の安定性を決定付ける極限引抜き荷重はアンカー長さや角度に依存し、初期緊張力とはほぼ無関係であるといえる。さらに、下段アンカーの引張力はアンカーの初期緊張力や設置角度、長さによって異なる推移をするものの、いずれのケースでも崩壊直前には増加するため、アンカー引張力の推移に留意した山留め施工管理は有効であると結論付けることができる。

3.2 山留め壁体の変位

図 5 に山留め壁体の変位分布を示す。縦軸に地表面からの距離、横軸に壁体の変位量をプロットした。

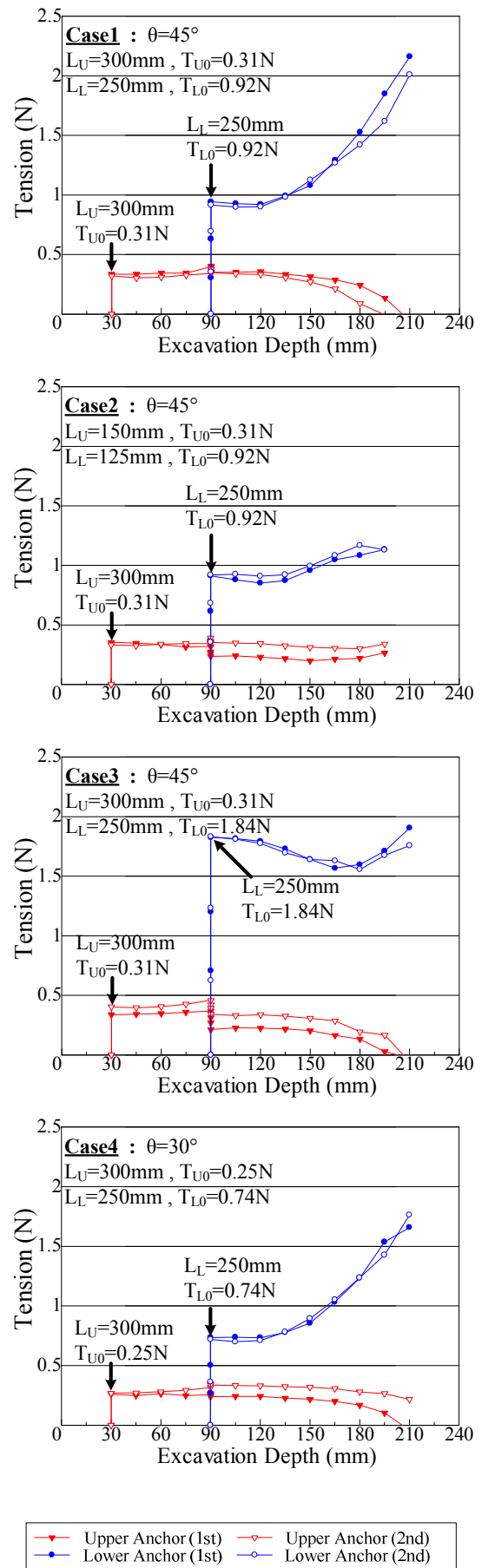


図 4 アンカー引張力の推移

図より、いずれのケースにおいても掘削深度 $d=150\text{mm}$ まで壁体の変位に明確な変化は見られないものの、その後更なる掘削($d \geq 180\text{mm}$)に伴って特に地表面からの深さ 150mm 辺りから壁体ははらみ出すように変位を生じることがわかる。ただし、崩壊直前の掘削深度 $d=180\text{mm}$ における変位モードはアンカー長によって異なり、アンカー長の長い Case1,3,4 では山留め壁頭部での変位は抑制される。一方、アンカー長の短い Case2 では山留め壁頭部での変位も顕著となり、山留め壁全体にわたる変位が増加することがわかる。これは先に示したアンカー引張力の推移の違いと同様に、アンカー長が十分ではなかったため明確な効果が得られなかったためと考えられる。また初期緊張力について Case1 と Case3 を比較すると、下段アンカーの初期緊張力の大きい Case3 では、山留め壁頭部の変位量が Case1 より僅かに小さいものの、明確な違いは確認できない。一方、アンカー傾角に着目すると、Case4 では $d=180\text{mm}$ 以深の掘削で山留めの変位が顕著となる傾向は他のケースと同様であるものの、山留め壁頭部の変位は崩壊直前までほとんど生じないことがわかる。以上のことから、掘削に伴って山留め壁体は中央付近からはらみ出すように変位するが、変位量や頭部の変位量の推移はアンカー長や角度によって異なる。したがってこの場合であれば、掘削深度 $d=150\text{mm}$ 以前に3段目のアンカーを設置することで壁体変位は抑制できることがわかる。この結果より、初期緊張力の影響は小さい。本実験で得られた結果からは、壁体の変位抑制という観点では、十分な長さのアンカーを傾角 30 度で設置したケースが効果的といえる。

3.3 地表面の沈下量

図 6 に各掘削深度における地表面の最大沈下量の推移を、図 7 に掘削に伴う地表面の沈下形状を表す。図 6 は地表面沈下量の最大値と掘削深度の関係を、図 7 は鉛直下向きを正とした地表面の変位量と山留め壁体からの水平距離の関係をプロットしている。

図 6 より、いずれのケースにおいても掘削初期にはほとんど変位を生じないが、ある掘削深度の閾値を超えた辺りから最大沈下量が増大する傾向にある。アンカー長の短い Case2 では $d=150\text{mm}$ あたりから最大沈下量が明確に増加し始め、それ以降は同一掘削深度における沈下量が他のケースよりも顕著に大きく、山留め周辺地盤はより浅い掘削深度で崩壊することがわかる。

図 7 に示した地表面沈下形状では、いずれのケースにおいても山留め壁近傍ほど沈下量が大きくなることがわかる。ただし、Case2 では他のケースよりもより広い範囲で沈下を生じていることから、アンカーが短く明確な支保効果を期待できないケースでは山留め壁の変位を抑制することができず、山留め背面の地盤でも広範囲にわたって沈下を生じることがわかる。一方、Case1 と Case3 における地表面沈下特性には明確な違いは認められず、下段

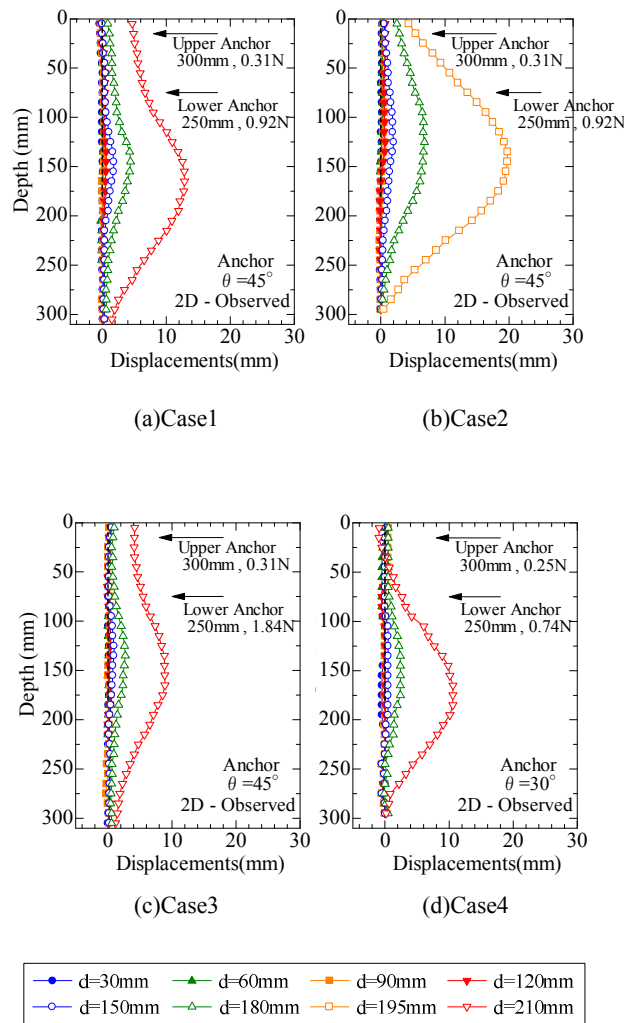


図 5 山留め壁体の変位分布

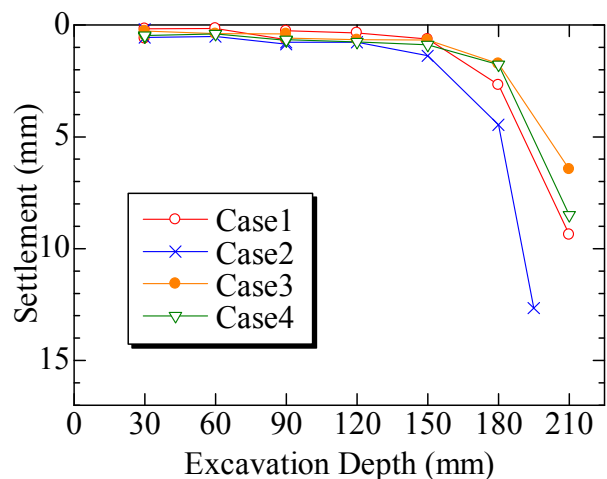


図 6 最大沈下量の推移

アンカーの初期緊張力は地表面の沈下形状にもあまり影響しないことがわかる。アンカー傾角を 30 度とした Case4 では、崩壊直前の掘削深度 $d=210\text{mm}$ における地表面沈下が Case1,3 に比べて局所的に生じることがわかる。

本節で示した結果より、アンカー長さや設置角度によって山留め壁周辺の地表面沈下特性は異なるが、アンカーの初期緊張力による影響は小さいといえる。本実験で得られた結果からは、傾角 30 度で十分な長さのアンカーを設置することで地表面沈下量や沈下を生じる範囲を抑制することができるといえる。

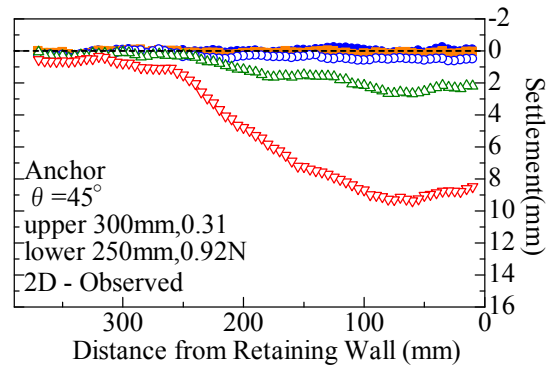
3.4 アンカーの引張力和山留め壁および周辺地盤の変形・破壊挙動との関係

上段アンカーの引張力は初期緊張力導入後、下段アンカー一設置まであまり変化しないが、下段アンカーの初期緊張力の導入に伴って減少する。このとき、下段アンカーの初期緊張力が大きいほど、上段アンカーの引張力の減少量は大きい。下段アンカー設置後も上段アンカーの引張力に顕著な増加は認められないため、適切な掘削深度で適切な緊張力を導入した下段アンカーを設置すれば上段アンカーの安定性は保持されるといえる。

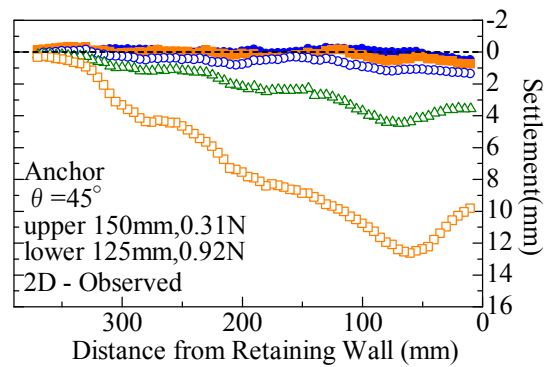
一方、下段アンカーの引張力の推移は山留め壁体の変位や地表面沈下と密接な関係がある。先に示した図 4 と図 6 からは、初期緊張力を導入したアンカー式山留め壁は、アンカーの初期緊張力や長さ、傾角による違いはあるものの、掘削深度の閾値（本実験では掘削深度 $d=150\text{mm}$ ）に達した以後、下段アンカーの引張力が増加し、それに呼応して山留め壁がはらみ出し、地表面沈下量が増大する。さらに深く掘削が進行すると、やがてアンカー引張力が増加して極限引抜き荷重に達し、山留め周辺地盤の崩壊に至ることから、下段アンカーの引張力は施工時における重要な観測項目といえる。つまり、設定した長さ、傾角のアンカーについて極限引抜き荷重を予め算定し、施工時にアンカーの引張力をモニタリングすることで、山留め周辺地盤の安定性を逐次把握することができる。本実験では、山留め壁体および周辺地盤の変形・破壊挙動を観察することを目的として、上下二段のアンカーを用いた山留め掘削について検討を行ったが、下段アンカーの引張力を観測して適切な掘削深度で三段目のアンカーを設置すれば、より深い掘削も実現できると考えられる。なお、アンカーの長さや傾角が同じケースでは、アンカーの初期緊張力による明確な違いは確認されなかったことから、山留めと周辺地盤の変位を抑制するためにはある程度の初期緊張力を導入すれば十分であり、過度に緊張力を与える必要はないといえる。

3.5 効果的なグラウンドアンカー設置方法について

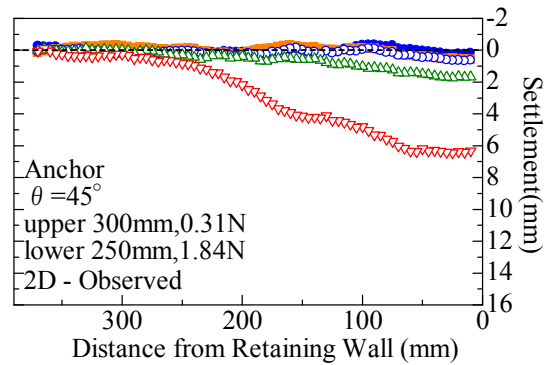
山留め周辺の地盤が崩壊する際のアンカーの引張力、すなわち極限引抜き荷重はアンカー長に大きく依存する。ア



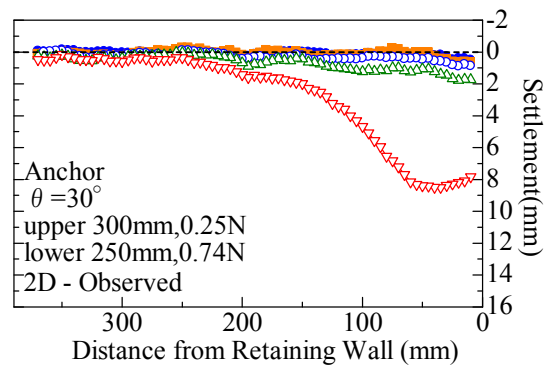
(a)Case1



(b)Case2



(c)Case3



(d)Case4

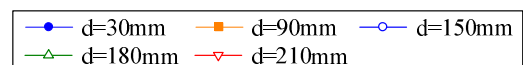


図 7 地表面の沈下形状

ンカーが短く、アンカー体定着部の外側の地盤にすべり面が形成される場合には、アンカー体の十分な引抜き抵抗を期待できず、山留め壁および周辺地盤の変位は抑制できない。

アンカー傾角の違いは、掘削に伴う沈下量の推移にはあまり影響を及ぼさないものの、傾角 $\theta=30^\circ$ で設置したアンカーは崩壊直前まで山留め壁頭部の水平変位を抑制し、 $\theta=45^\circ$ のケースよりも地表面沈下の影響範囲を抑えることがわかった。図 8 と図 9 は掘削に伴うアンカー引張力の水平成分と鉛直成分の推移を示しているが、これらの図より、下段アンカーの引張力が増加して極限引抜き荷重に達したときの緊張力の水平成分がほぼ等しい値を示すのに対し、緊張力の鉛直成分は傾角 30° のケースにおいて小さくなる。したがって、アンカーの引張力によって背面地盤に作用する力がアンカー傾角によって異なるため地盤の変形モードが異なり、壁体頭部の変位および地表面の沈下形状に違いが生じたと考えられる。

以上のようなことから、グラウンドアンカーはアンカー体が想定すべり面の外側の地盤に定着するような適切な長ささと緊張力で設置し、十分な引抜き抵抗力を発揮させることが重要といえる。

4. 結論

本研究では、グラウンドアンカーを用いた山留め支保メカニズムについてアンカーの初期緊張力、長さ、傾角を変化させて 2 次元模型実験を行った。本実験の結果から、グラウンドアンカー式山留め掘削の設計・施工にあたって、適切な傾角および十分な長さのアンカーを設置することで山留め壁の十分な支保効果を得ることが出来ることがわかった。また、アンカーの引張力と山留め壁体の変位および地表面の沈下量の関係から、掘削に伴う下段アンカーの引張力の推移に留意することが重要であり、その発揮される引張力は初期緊張力の大小によらないことがわかった。ただし、実現場ではアンカーに大きな引張力が持続的に作用すると軟弱地盤や背面地盤の性状によってはクリープ変形を生じることも予想されるが、本研究では砂質地山を想定したモデル化を行っていることに注意されたい。

今後は今回検討を行ったケースに加え、さらに異なるアンカー傾角やアンカーの本数をパラメトリックに変化させた場合の実験を行い、アンカー式山留めの支持特性や合理的な適用法について検討を行う予定である。

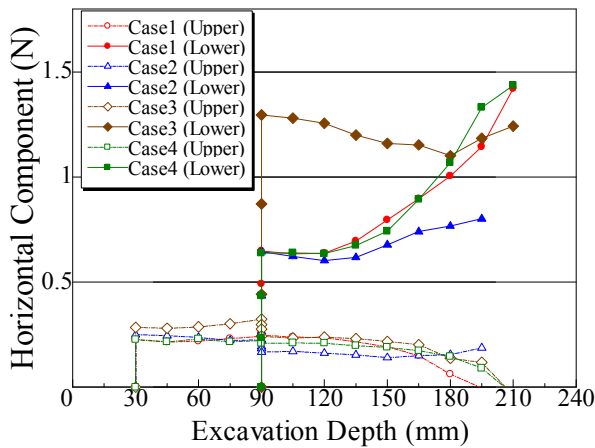


図 8 山留め壁に作用する水平分力の推移

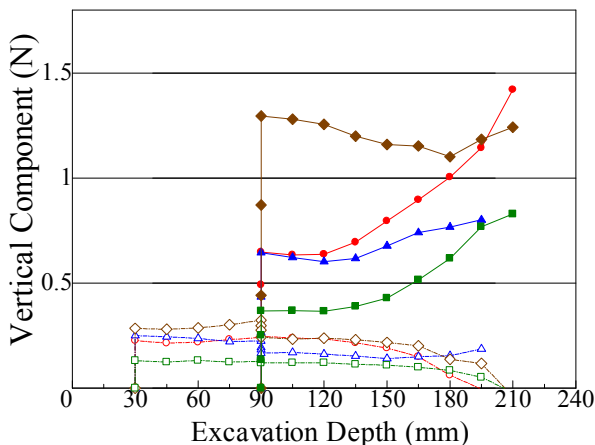


図 9 山留め壁作用する鉛直分力の推移

参 考 文 献

- 1) Nakai, T., Kawano, H., Murata, K., Banno, M. and Hashimoto, T. (1999) Model tests and numerical simulation of braced excavation in sandy ground: influences of construction history, wall friction, wall stiffness, strut position and strut stiffness, *Soils and Foundations*, 39(3), pp.1-12.
- 2) Nakai, T., Farias, M. M., Bastos, D. and Sato, Y. (2007) Simulation of conventional and inverted braced excavations using subloading t_{ij} model, *Soils and Foundations*, 47(3), pp.597-612.
- 3) Hoshiya, M. and Mandal, J. N. (1984) Some studies on anchor plates in sand, *Soils and Foundations*, 24(1), pp.9-16.
- 4) 社団法人地盤工学会, グラウンドアンカーの調査・設計から施工まで, 報光社, pp.158-217, 1997