

開削工事の支保工最小化を目指した頭部固定式二重土留め工法の開発

Development of Self-supporting Retaining Structure Using Double Sheet Pile Walls
with Head Fixing Aimed to Minimize Supports Required in Excavation Work

那 須 郁 香 永 谷 英 基 平 陽 兵 中 本 詩 瑠
玉 野 慶 吾 井 上 直 史¹⁾ 内 田 拓 史²⁾ 坂 梨 利 男³⁾

要 約

開削工事における躯体構築の生産性向上を目的として、掘削時の支保工を最小化できる合理的な土留め工法が求められている。そこで2枚の矢板を狭い間隔で前後に並べて設置し、互いの頭部を固定することで支保工の最小化を可能とする「頭部固定式二重土留め工法」を開発した。掘削にともなう土留めの変位抑制効果を検証するため、1/50縮尺模型による遠心模型実験と実物の1/4縮尺の大型模型実験を実施し、本工法の有効性を確認した。さらに、本工法を実現場に適用し、深さ5.4mの無支保掘削を実現した。

目 次

- I. はじめに
- II. 遠心模型実験
- III. 大型模型実験
- IV. 現場適用
- V. まとめ

I. はじめに

開削工事では、土留め壁を支えるために切梁や中間杭などの支保工を用いることが多い。これらの部材は、掘削した空間における躯体構築の作業を妨げ、施工時の生産性を低下させる要因になっている。この問題を解決する方法の一つに、掘削範囲外へ設置する支保工（グラウンドアンカーや控え杭）や、壁剛性を上げるSMWなどの土留め工法があるが、作業エリアの制限、高コスト、特別な設備が必要などの理由で、必ずしも適用できるとは限らない。そこで筆者らは、比較的浅い掘削深度において、敷地に余裕がない工事にも対応できる、無支保で施工可能な頭部固定式二重土留め工法（以下、二重土留め工法とする）を開発した¹⁾²⁾。本工法は、2枚の鋼矢板に離隔を設けて二重に設置しそれらの頭部を剛な形で連結するものである。Fig.1に示す3つの効果を利用して、掘削に伴う背面地盤からの水平荷重に効率的に抵抗する機構としている。

本報文では、1/50縮尺模型による遠心実験により本工法の

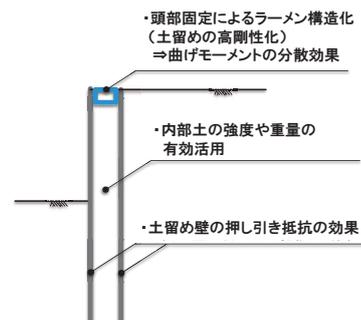


Fig.1 二重土留め工法の概念
(Concept of Double Sheet Pile Walls)

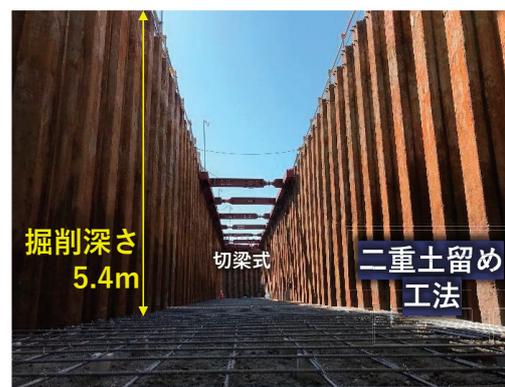


Photo 1 二重土留め工法現場適用状況
(Field Application of Double Sheet Pile Walls)

- 1) 土木設計本部 Civil Engineering Design Division
- 2) 関東支店 Kanto Branch
- 3) 土木管理本部 Civil Engineering Management Division

キーワード：開削工事，鋼矢板，頭部固定，変形抑制，遠心模型実験，実大実験，現場適用

Keywords：excavation work, sheet pile, head fixing, deformation suppression, centrifuge experiments, physical model experiments, field application

変形抑制効果を確認し、1/4 縮尺の大型模型実験により大型規模での工法成立性を評価したのち、現場適用 (Photo 1) を行ったのでそれらの結果を報告する。

土留め頭部の水平変位は一重土留めの場合の約 4 分の 1(54mm)に抑えられ、背面地盤に対する明確な変形抑制効果を確認することができた。

II. 遠心模型実験

二重土留め工法における頭部固定の効果と隔離が背面地盤の変形抑制効果に与える影響を確認するため遠心模型実験を実施した。

1. 実験概要

遠心模型実験に用いた模型地盤を Fig.2 に示す。模型地盤は土留め模型を予め設置した剛土槽内に豊浦乾燥砂を空中落下させて作成した。土留め模型の前面に設置したゴムパック内に模型地盤と同じ密度に調整したヨウ化ナトリウム水溶液を模型地盤の天端と同じ高さになるように満たした。実験は遠心加速度 50G の下で実施し、ゴムパック内のヨウ化ナトリウム水溶液を排出することで掘削を再現した。模型地盤の物理特性を Table 1 に、実験ケースを Table 2 に示す。実験ケースは従来工法の一重土留めと、二重土留めの頭部固定効果を検証するため頭部の有無を変えたケース、鋼矢板の隔離影響を検証するために隔離を変えたケースを実施した。

一重土留めと二重土留めの模型には厚さ 1.5mm のステンレス板を使用し、頭部固定式二重土留めは 2 枚のステンレス板の頭部に、アルミ製角パイプを上下 2 段 30mm 間隔でボルトを連結して模擬し、頭部固定部の高さは 20mm とした。実験中は土留め頭部の水平変位、土留めの鉛直方向のひずみ分布とゴムパック内のヨウ化ナトリウム水溶液の排出深さを計測した (Fig.2)。

2. 実験結果と考察

以下では、実験結果をすべて実物換算スケールで示す。

(1) 土留め頭部の水平変位

Fig.3 にヨウ化ナトリウム水溶液の排出 (掘削) に伴って生じる土留め頭部の水平変位の時刻歴を示す。土留め頭部に生じた水平変位は一重土留めの場合が最も大きく、掘削深さ 5m の約 4% (189mm)であった。また、頭部フリーの二重土留めについても、前面鋼矢板の頭部水平変位は掘削深さ 5m の約 3% (145mm)であり、一重土留めとほぼ同等であることがわかった。一方、隔離 1m の頭部固定式二重土留めの場合、

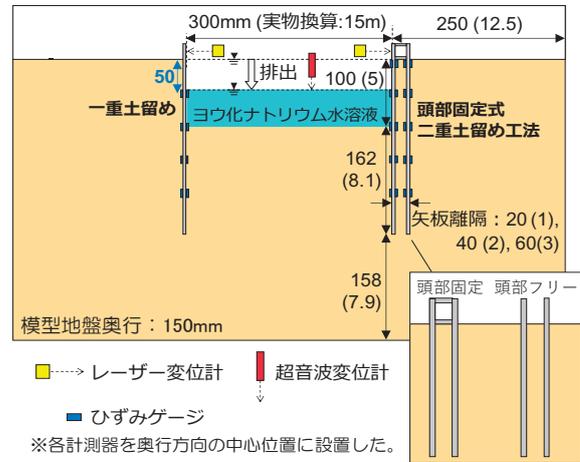


Fig.2 模型地盤概要

(Overview of Model Ground of Centrifuge Experiments)

Table 1 模型地盤の物理特性

(Physical Properties of Model Ground)

地盤材料	豊浦砂 (気乾状態)
相対密度 D_r [%]	60
単位体積重量 γ_t [kN/m ³]	14.7
内部摩擦角 ϕ [°]	32

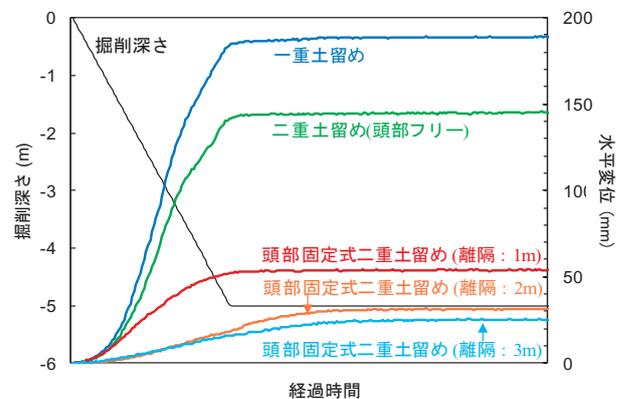


Fig.3 掘削に伴う土留め頭部水平変位

(The Head Horizontal Displacement with Excavation)

Table 2 実験ケース一覧

(List of Experimental Cases)

実験ケース	対象工法	鋼矢板曲げ剛性 [kN・m ² /m] (実物換算スケール [kN・m ² /m])	土留め頭部 固定状態	土留め隔離 [mm] (実物換算スケール [m])
Case1	一重土留め	0.056 (7.0×10 ³) IV型鋼矢板の 1/8 相当	-	-
Case2	二重土留め		頭部フリー	20 (1)
Case3			頭部固定	20 (1)
Case4			頭部固定	40(2)
Case5			頭部固定	60(3)

離隔が3mの場合、土留め頭部に生じた水平変位は掘削深さ5mの約0.5%(26mm)であった。

(2) 曲げモーメント

Fig.4 に掘削過程終了後の土留め中央部に生じた曲げモーメントの深さ分布を示す。一重土留めの場合、掘削底面付近に曲げモーメントのピークが見られ、最下端を固定端とする片持ち梁と同様な変形モードを示した。また、頭部フリーの二重土留めについても、前面矢板に一重土留めとほぼ同様な曲げモーメント分布がみられた。一方、頭部固定式二重土留めの場合、土留め壁に発生する曲げモーメントは前面と背面の鋼矢板に分散され、地すべり抑止杭に近い変形モードを示した。また、鋼矢板間の離隔が1mの頭部固定式二重土留めの場合、前面矢板と背面矢板に同様な曲げモーメント分布がみられたが、離隔が2mの場合、背面矢板に発生する曲げモーメントは前面矢板よりも抑えられた。これは、背面矢板が控え杭に近い挙動を示したためだと考えられる。なお、鋼矢板間の離隔が3mの場合でも曲げモーメント分布は離隔が2mの場合とほぼ同様であった。

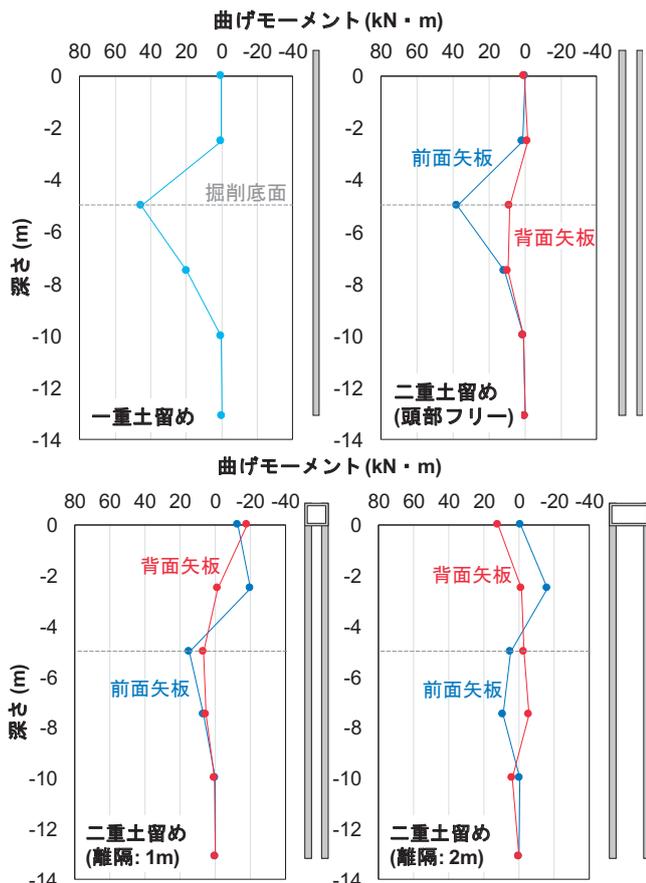


Fig.4 掘削過程終了後の土留めに生じた曲げモーメントの深さ分布

(Depth Distribution of Bending Moment in Earthen Retaining Wall after End of Excavation Process)

III. 大型模型実験

遠心模型実験では頭部固定の有無など基本的な二重土留めの変形抑制効果を検証した。そこで、より詳細に検証するため、1/4 スケールの大型模型実験を実施した。

1. 実験概要

Fig.5 に1/4 スケールの大型模型実験の概要図を示す。模型地盤は、幅(奥行方向)2,500mm、長さ6,000mm、深さ3,700mmである。実験では深さ1,750mmの掘削を段階的に行った。実験ケースは2ケースで、鋼板頭部とH形鋼をボルトで剛に連結した頭部固定構造を有する二重土留めと、比較のために実施した従来工法の一重土留めの2種類を対象とした。両者とも矢板長さは3,300mmとした。矢板(鋼板)の両端部にはグリースを塗布したゴム板を取り付け、鋼板と土槽間の摩擦軽減を図った。鋼板の基本物性をTable 3に示す。二重土留めでは、前後の矢板の水平距離を250mmとした。

土槽内に鋼板を設置した後、所定量の山砂を投入し30cm/層×10層で締固め度Dc=85%を目標に締め固めた。地盤の密度および含水比は実験終了後にサンプリングし確認した。粘着力 c' および内部摩擦角 ϕ' はJGS 0527「不飽和土の三軸圧縮試験方法」に準拠しCU試験にて取得した。Fig.6に使用した千葉県産山砂の基本物性と粒度分布、Table 4に作製した地盤の含水比と密度の実測値を示す。

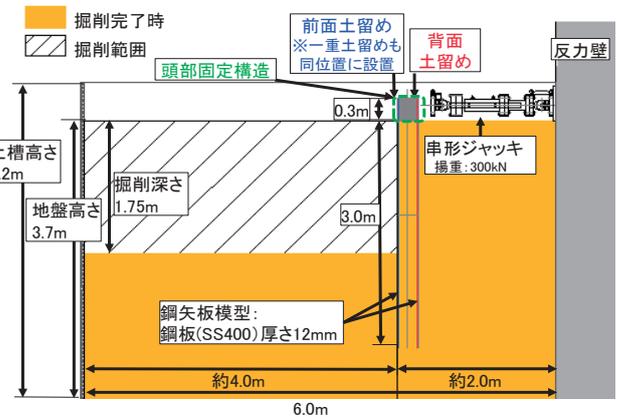


Fig.5 1/4 縮尺の大型模型実験概要図 (Schematic View of Physical Modeling Experiments in 1/4 Scale under Earth's Gravity Conditions)

Table 3 鋼板の基本物性 (Parameters for Model Sheet Piles)

物理量	記号	鋼板(SS400)	単位
ヤング率	E	1.9×10^8	kN/m ²
厚さ	t	12	mm
断面二次モーメント	I	14	cm ⁴ /m
剛性	EI	2.8×10	kN・m

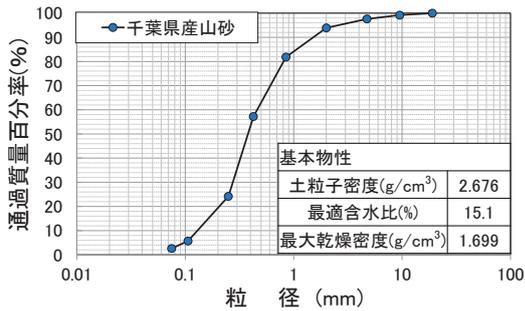


Fig.6 千葉県産山砂の基本物性と粒度分布
(Basic Properties and Particle Size Distribution of Natural Sand in Chiba Prefecture)

Table 4 模型地盤の含水比と密度の実測値
(Measured Values of Model Grounds)

項目	記号	一重土留め	二重土留め	単位
含水比	w	15.2	14.5	%
乾燥密度	ρ_d	1.45	1.48	g/cm³
湿潤密度	ρ_t	1.70	1.70	g/cm³
	D_{50}	0.37	0.37	mm
均等係数	U_c	3.2	3.2	
締固め度	D_c	85	87	%
粘着力	c'	8.6	8.6	kN/m²
内部摩擦角	ϕ'	35.9	35.9	°

2. 実験手順

実験は、①深さ 1.75m の掘削実験、②ジャッキによる土留め頭部への加力実験の 2 段階に分けて実施した。これは、掘削による土圧変化のみでは土留めに作用する荷重が小さいことが想定されたため、ジャッキを用いて頭部水平変位 190mm まで強制的に変形させることで、本工法の大変形時における挙動を確認するためである。Fig.7 に実験手順を示す。



Fig.7 実験手順
(Experiments Procedure)

3. 実験結果と考察

(1) 掘削実験

Fig.8 に 1.75m 掘削時の土留めの水平変位分布を示す。水平変位分布は、土留め下端を固定端と仮定し、鋼板に貼付したひずみゲージから求めた曲げひずみを積分して変位分布を算出した。また、頭部水平変位は変位計で計測した値である。Fig.8 に示すように一重土留めの頭部水平変位 35mm に対して、二重土留めでは 2mm と一重土留めの 1/18 程度で、大きな変位抑制効果が確認できた。

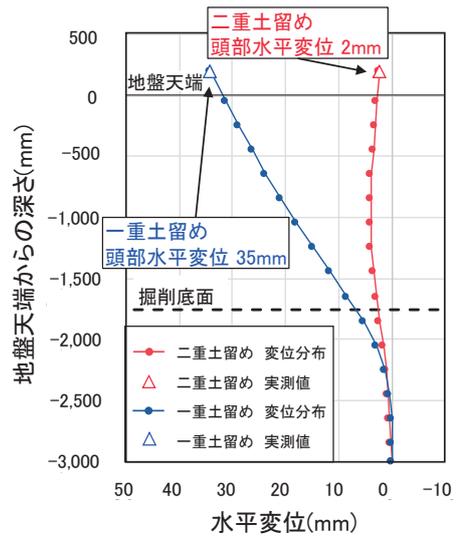


Fig.8 最終掘削時の水平変位分布
(Distribution of Horizontal Displacement after 1750 mm Excavation)

(2) 加力実験

Fig.9 に加力時の二重土留めおよび一重土留めの載荷荷重および両者の比と、頭部水平変位との関係を示す。ジャッキにより土留め頭部を強制変位させた結果、頭部水平変位 195mm までの載荷荷重の最大値は、一重土留めでは 1.1kN であったのに対して、二重土留めでは 8.0kN となり、同程度の頭部水平変位に対し約 7.6~10.6 倍の加力を必要とした。

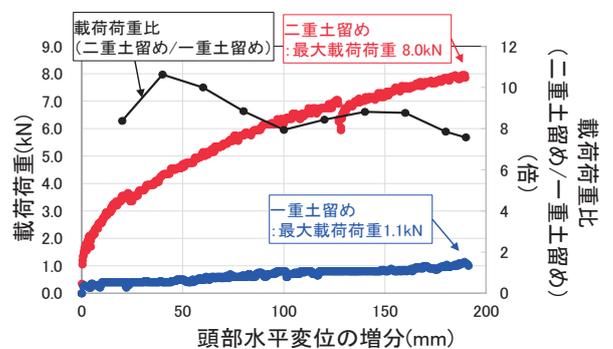


Fig.9 加力時の頭部水平変位と載荷荷重, 載荷荷重比
(Relationship between Horizontal Displacement of Head during Loading and Load)

Fig.10に一重土留め並びに二重土留めの曲げモーメント分布図を示す。1/50 縮尺模型の遠心実験結果と同様に、一重土留めと比べて二重土留めの頭部付近で前面側が引張となる曲げモーメントが大きくなった。これは、頭部固定の影響であり変位抑制に寄与していると推察される。

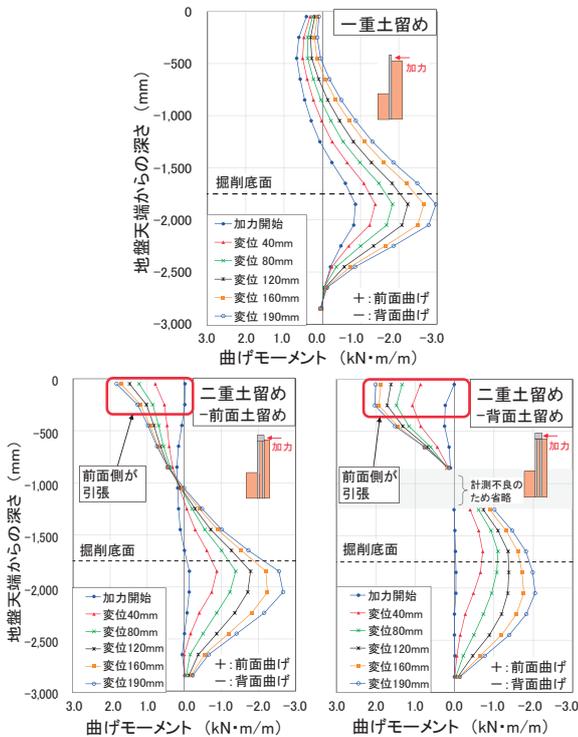


Fig.10 加力実験時の曲げモーメント分布
(Distribution of Bending Moments of Compulsory Head Horizontal Displacement by Loading)

IV. 現場適用

遠心模型実験と大型模型実験より本工法の有効性を確認したことを受けて実現場に適用した。

1. 構造概要

対象工事は、掘削幅 4m、深さ 5.4m の開削仮水路土留めである。基本設計は Fig.12 の土留め断面図に示す 1 段切梁式(腹起し・切梁とも H-300) で、土留め壁は鋼矢板Ⅲ型であった。このうち一部区間 (L=12m) において二重土留め工法を適用した。前列と後列の鋼矢板を離隔 1m で配置し、頭部の固定方法は①鋼材プレス構造と②RC 構造の 2 パターンについて実施することで、施工性を比較した。なお、本工法の効果と設計の妥当性を検証するため、土留め壁の変位、ひずみを計測した。

2. 施工結果

鋼矢板はウォータージェット併用パイプロハンマ工法で打設した。Photo2 に頭部固定構造の施工状況を示す。①鋼材プレス構造は、2 枚の鋼矢板の間のみ掘り下げることで施工できるが、プレスの溶接作業と土留め撤去時のプレス鋼材と施工機械の干渉により施工性が低下する。②RC 構造では、鋼矢板間に鉄筋を設置しコンクリートを充填するため鋼矢板ジョイント部の頭部溶接も不要となるが、土留め撤去時のコンクリート解体作業が必要となる。以上を踏まえて、他現場へ展開する場合には、現場条件やニーズを考慮し頭部固定構造を選択することが望ましい。

Photo 3 に切梁式と二重土留め工法の掘削状況を示す。切梁式の場合は切梁長がおよそ 3m と狭いため、掘削の施工性は悪く、0.8m³ 級油圧ショベルの使用が困難であり、スライドアーム型やコラムシェル型の重機を用いる必要があった。また、掘削中に重機のアームやアタッチメントが切梁や腹起しに接触するリスクが極めて高く、監視・誘導役の配置が必須で慎重な重機操作が要求された。

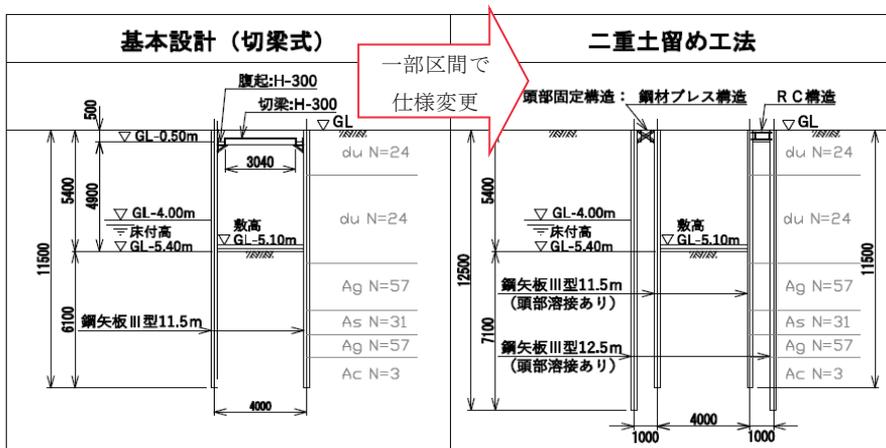


Fig.11 土留め断面図
(Cross-sectional View of Earth Retaining Wall)



Photo 2 頭部固定施工状況
(Construction Status of Head Fixing)

一方、二重土留め工法では無支保のため Photo 3 のように 0.8m³ 級油圧ショベルで容易に、かつ底面までを連続して掘削が行え、二重土留めの大きな利点を発揮することができた。



Photo 3 掘削状況
(Excavation in Construction Site)

3. 計測結果

前列土留め壁 (L=11.5m) の傾斜計から得られた水平変位分布とひずみ計から得られた曲げモーメント分布を Fig.12 に示す。設計値は、地盤の水平抵抗、せん断抵抗を弾塑性ばねでモデル化したラーメン骨組み計算である設計法より算出した。計測値に比べ設計値は絶対値が大きいが同じモード (後列も同様) を示しており、概ね設計の妥当性を確認することができた。設計値と計測値の相違発生理由として、設計で見込んでいない施工条件や地下水位の影響が考えられる。特に、鋼矢板打設時はウォータージェットを用いたことで内部土地盤が水締め効果により密度増加し、矢板と周辺地盤の摩擦抵抗が増加した可能性があるため、今後検証を行う予定である。

V. まとめ

遠心模型実験、大型模型実験および現場適用による検証で、二重土留め工法の有効性および安全性を確認できた。今後は

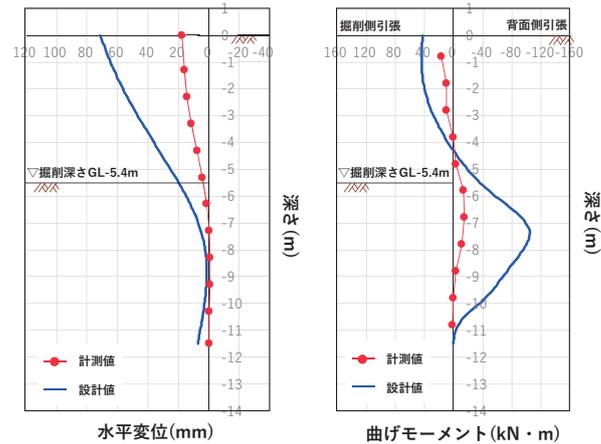


Fig.12 計測値と設計値の比較
(Comparison of Measured and Designed Values)

様々な条件における本工法の効果やコスト検証を行い、本工法のメリットを活かせる実工事へ展開していく。さらに、設計法の改善によるさらなる合理化と、より掘削の深い土留めへの適用拡大についても検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 坂梨ほか：開削施工合理化を目指した無支保土留め工法の開発 (その 1), 第 75 回土木学会全国大会, VI-121, 2020.
- 2) 井上ほか：開削施工合理化を目指した無支保土留め工法の開発 (その 3), 第 75 回土木学会全国大会, VI-123, 2020.
- 3) 内田ほか：頭部固定式二重土留め工法の実施工への適用, 第 76 回土木学会全国大会, 2021 (投稿中) .

Development of Self-supporting Retaining Structure Using Double Sheet Pile Walls with Head Fixing Aimed to Minimize Supports Required in Excavation Work

Ayaka Nasu, Hideki Nagatani, Yohei Taira, Sion Nakamoto
Keigo Tamano, Naoshi Inoue¹⁾, Takushi Uchida²⁾ and Toshio Sakanashi

To improve the productivity of excavation work, there is a need for an effective earth-retaining method that can minimize the number of supports required during excavation work. In this paper, we present a novel method for minimizing this number by installing two sheet piles side by side at narrow intervals and fixing their heads. The displacement suppression effect of this method was confirmed in experiments using a centrifuge model at 1/50 scale and model experiments conducted at 1/4 scale under Earth gravity conditions. The physical model experiments showed much smaller deformation compared with the conventional method and proved that this method is effective at restraining displacement. After the model experiments, we used this method at a real construction site.