

鋼矢板を用いた斜め土留め工法

高橋 真一 杉江 茂彦 松本 伸
(本社土木本部)

嶋田 洋一 坂平 佳久 前田 知就
(本社土木本部) (本社土木本部) (本社土木本部)

Inclined-braceless Excavation Support using Sheet Pills

Shinichi Takahashi Shigehiko Sugie Shin Matsumoto
Yoichi Shimada Yoshihisa Sakahira Tomonari Maeda

Abstract

The low construction costs of inclined-braceless excavation support using sheet pills give it an advantage over other types of earth-retaining walls. This paper describes centrifuge model tests carried out on a diagonally shaped cantilever earth-retaining wall. The model tests were carried out as follows. A model ground with an earth-retaining wall was constructed using dry sand. After constructing the model, the centrifuge gravity was increased to 50 G. The main results of the tests were as follows. 1) The larger the inclination of the earth-retaining wall, the lower is the pressure acting on it. 2) The larger the inclination of the retaining wall, the smaller is its deformation.

概 要

土留めを傾斜させる斜め土留め工法は、土留めに加わる土圧は理論的には減少し、その結果土留めの変形の低減が期待できる。しかしこれまで、斜め土留めの実績はなく、土留めに作用する土圧や土留めの変形の低減効果に不明確な部分も多かった。そのため、実地盤の応力を再現できる遠心模型実験を行い、鋼矢板を用いた斜め土留め工法の効果を検証した。遠心模型実験は、遠心加速度50G場で最大10m掘削相当の土留め地盤を再現し、地盤変形、安定性や、土留めに作用する土圧を観察した。斜め土留めでは、土留めに作用する土圧と変形を直立土留めに比べて減少する効果を確認するとともに、土留め変形の抑制対策として控え壁の効果が有効であることを確認した。またこれらの結果を受けて、実際の現場に鋼矢板を用いた斜め土留め工法を適用し、無事工事を進めることができた。

1. はじめに

自立土留めは、切ばり、腹起し等の支保工を用いず、主として掘削側の地盤の抵抗によって、土留め壁を支持する工法である。掘削面側に支保工がないため掘削が容易である大きな特徴がある。しかし、支保工がないデメリットとして土留め壁の変形が大きくなりやすいため、一般には掘削深さ3～4m程度と比較的浅い掘削深さの場合に採用される¹⁾。

土留め壁の傾斜は、土圧理論上、土留め壁へ作用する土圧の低減効果が期待できるため、従来形式より作用土圧が小さな土留めが可能と考えられる。斜め土留め工法は、直立に土留め壁を構築する場合に比べて背面土圧の低減が期待されるため、壁剛性の低減やFig. 1に示すように支保工を省略できるという特徴がある。このため、掘削深度や地盤条件によっては、直立土留めより斜め土留めが、工程的・経済的に有利になる場合がある。

著者らはこれまで、地盤改良壁の土留めを対象に斜め土留め工法の効果を遠心模型実験で検証した²⁾。本論文

では、同様な方法で砂地盤の鋼矢板斜め土留めに関する遠心模型実験を行い、作用土圧や変形観測から斜め土留めの効果について実験的に検証するとともに、土留め変位の厳しい施工条件への対策として控え壁の効果、ならびに実施工への適用結果について示した。

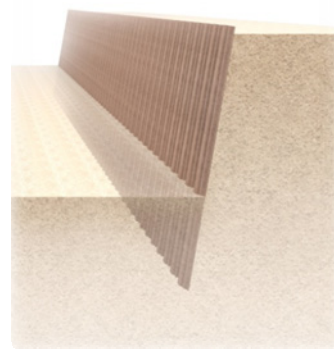


Fig. 1 斜め土留め工法
Inclined-braceless Excavation Support

2. 遠心模型実験による安定性検討

2.1 実験方法

Photo 1, およびTable 1には, 模型実験に使用した遠心模型実験装置の全景とその仕様³⁾を示す。

Fig. 2, Photo 2に模型地盤の概要を示す。図中には傾斜した土留めのケースを示した。一連の実験では直立土留め, 斜め土留めの2ケースの模型地盤を同時に搭載して実施した。乾燥砂地盤を対象とした自立土留めを模擬するため, あらかじめ土留めを有する模型地盤を作製した後, 遠心力を最大50Gまで増加させる方法で実験を進めた。使用した土槽の内寸法は, 幅80cm×高さ50cm×奥行き20cm, 前面はアクリル板を使用し, 地盤変位の計測が可能である。また, 土槽と模型地盤の間には摩擦低減のためテフロンシート (厚さ0.2mm) を貼付している。模型地盤深さは44cm, 土留め壁の高さは36cmである。

Table 2に実験ケースを示す。Case1～Case3は土留め壁の傾斜の比較, またCase4, Case5は自立土留めでより変形要求が厳しい条件への対応策として控え壁を設けた効果の検証を目的とした。

土留め壁は, IV型鋼矢板を用いた土留め壁を想定し, 曲げ剛性の相似則を考慮してt7mmのアルミ板を用いた。土留め壁には, 小型土圧計 (φ6mm, 容量1MN/m²) を主働側7箇所, 受働側4箇所に設置した。控え壁は塩ビ板を用いて土留め壁とはヒンジ構造で接続した。Photo 3に土留め壁模型を示した。

模型地盤は, 土留め壁を所定の場所に設置した後, 乾燥した豊浦標準砂を空中落下方法で所定密度になるよう調整して作製した。実験では, 1G場で所定の深度まで掘削後, 遠心加速度を50Gまで増加させる方法を繰り返して掘削過程を模擬した。

実験では, 遠心加速度を増加させながら, 土留め壁に作用する土圧, 土留めの水平変位, 土留め壁背面地盤の沈下, ならびにCCDカメラによる模型地盤側面からの地盤変形挙動を観測した。



Photo 1 遠心模型実験装置
Obayashi Centrifuge Facility

Table 1 遠心模型実験装置の主な仕様³⁾

Performance of Centrifuge	
項目	仕様
最大回転半径	7.0 m
最大搭載容量	6.9 MN・g
最大搭載重量	69 kN
搭載広さ	2.2m×2.2m

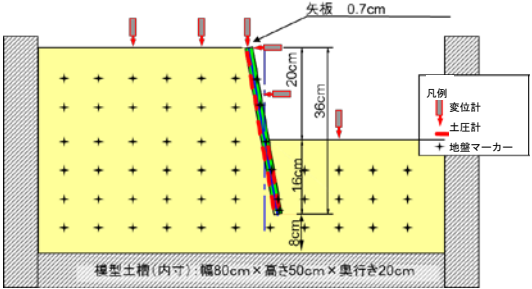


Fig. 2 模型地盤の概要
Cross Section with Retaining Wall in Dry Sand

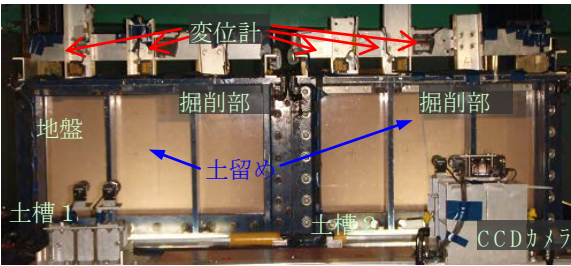


Photo 2 直立および斜め土留め模型
Centrifuge Model

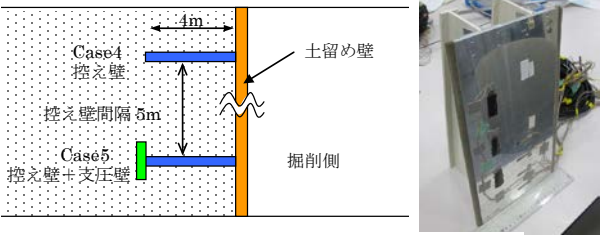
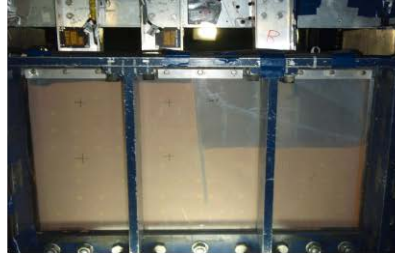
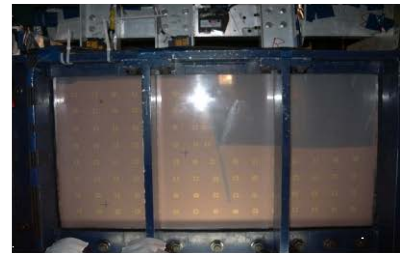
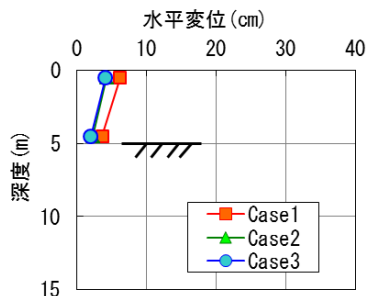
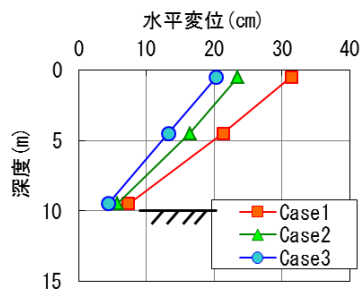
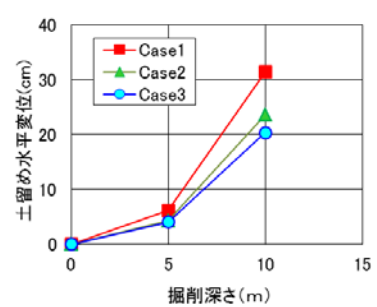
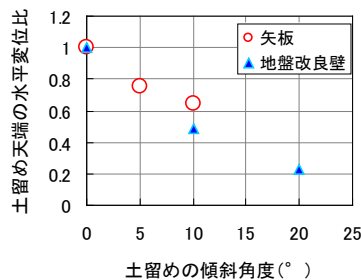
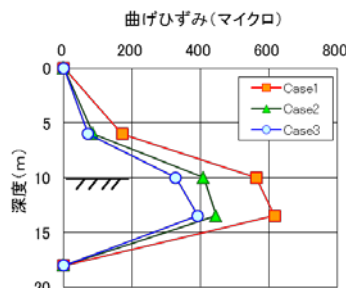
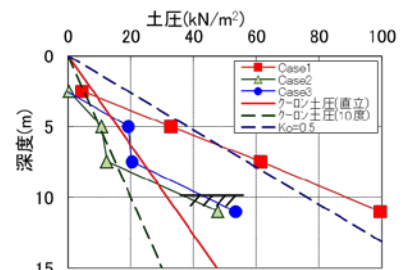


Photo 3 控え壁を有する土留め壁模型
Retaining Wall Model

Table 2 実験ケース
Model Tests Conditions

Case No.	1	2	3	4	5
土留め傾斜角	直立	5°	10°	10°	10°
控え壁	—	—	—	控え壁	控え壁 支圧壁
土留め模型	アルミ製 厚さ7mm (IV型矢板をモデル化)				
地盤	材料: 豊浦標準砂 (乾燥) 密度: $\rho_d=1.55\text{g/cm}^3$ (空中落下方式) $Dr=70\%$				
掘削過程	Step1: 掘削深さ10cm (50G場で5m相当) Step2: 掘削深さ20cm (50G場で10m相当)				


 Photo 4 Case1 10m 掘削後
Case1 after 10m Excavation

 Photo 5 Case2 10m 掘削後
Case2 after 10m Excavation

 Photo 6 Case3 10m 掘削後
Case3 after 10m Excavation

 Fig. 3 土留めの水平変位(5m)
Lateral Displacement

 Fig. 4 土留めの水平変位(10m)
Lateral Displacement

 Fig. 5 掘削深さと土留め水平
Excavation Depth and Displacement

 Fig. 6 土留め壁の施工法と傾斜角の影響
Effect of Incline

 Fig. 7 土留めの曲げひずみ
Bending Moment of Retaining Wall

 Fig. 8 主働側の土圧分布
Earth Pressure

2.2 実験結果

2.2.1 土留めの傾斜の効果 Photo 4, Photo 5, Photo 6は、10m掘削時のCase1, 2, 3各模型の地盤状況を示した。掘削に伴い、直立のCase1では土留め壁の水平変位は土留め壁が前傾した状態になってしまうのに対して、土留めに傾斜をもたせたCase2, 3では前傾状態まで至っていない。

Fig. 3, Fig. 4は掘削に伴う土留めの水平変位の深度分布である。掘削範囲では土留め壁はすべて掘削側に変形し、その量は土留めの傾斜が大きいほど小さな傾向を示している。Fig. 5は掘削深さと土留め天端付近の水平変位の関係である。土留めの傾きに関係なく掘削深度が5mから10mに2倍増えた条件で水平変位は4倍程度に増加している。ほぼ掘削深さの2乗になり、掘削に伴う主働側土圧の大きさが、クーロン土圧等で掘削深さの2乗に比例することに対応している。地盤改良土留め実験²⁾では、10m掘削時の水平変位は約21mmであった。矢板モ

デルの土留めの変位がやや大きな変位量を示した。地盤改良壁は矢板に比べて自重や地盤との壁面摩擦が大きいことが、この変位量の差に現れたと考えられる。

Fig. 6は、土留めの傾斜と土留め天端の水平変位の関係である。図中には地盤改良土留めの実験結果²⁾も付記している。10°の傾斜で40%程度、変位が減少している。この土留めの傾斜角の増加に伴う変位の低減程度は、地盤改良壁に比べて若干の差はあるものの、同様の傾向を示している。

Fig. 7は、10m掘削時の土留めの曲げひずみの分布である。土留めの傾斜にかかわらず土留め天端から掘削底面付近まで増加する傾向は同じであるが、土留め傾斜が大きいほど最大曲げひずみが小さくなる傾向となる。

Fig. 8は、10m掘削時の主働側の壁面土圧の分布である。土留めを傾斜させた実験結果は直立条件Case1に比べて土圧が小さな傾向は、土留めの変形とも整合している。土圧の上端部分では土圧の分布が地表面からの比例した

分布ではない。数 kN/m^2 と小さな粘着力 c を有する影響や低拘束圧下では内部摩擦角 ϕ が大きくなる現象の表れであると考えられる。図中に付記した静止土圧等と Case1 は同等の土圧分布を示しているが, Case2 と Case3 は逆転し, この実験での土圧計測の課題と考えられる。

2.2.2 補助工（控え工）の効果 Fig. 9は, 10m掘削時の土留め天端の水平変位の鉛直分布である。Case3と同じ傾斜で控え壁を設けたCase4, Case5では, Case3に比べて変位量は50%~70%と大幅に低減し, 控え壁による変位抑制効果が確認できる。

Fig. 10 は, 掘削深さと土留め天端付近の水平変位の関係である。Case1, Case2, Case3 は土留めの傾斜に関係なく掘削深度が5mから10mに2倍増えた条件で水平変位は4倍程度に増加している。ほぼ掘削深さの2乗になり, 掘削に伴う主働側土圧の大きさが, クーロン土圧等で掘削深さの2乗に比例することに対応している。控え壁のあるCase4, Case5は, 控え壁のないCase3に比べて変位抑制効果が掘削深さに関わりなく認められる。特に5m掘削時の変形に対しては顕著で変位がほとんど生じていない。

Fig. 11 は, 10m掘削時の土留めの曲げひずみの分布である。Case1, 2, 3を比較すると土留めの傾斜にかかわらず土留め天端から掘削底面付近まで増加する傾向は同じであるが, 土留め傾斜が大きいほど最大曲げひずみが減じる傾向となる。控え壁のあるCase4, Case5では, Case3に比べてさらに曲げモーメントが低下するとともに, 土留め上部で正負逆転するモードが現れ, 控え壁からの変位抑止力が土留めに伝達された影響が確認できる。

Fig. 12 は, 控え壁の有無による10m掘削時の主働側の壁面土圧の分布である。土留め天端の変位が抑制された結果, 抑制効果が大きなCase4, Case5の順序で土留め上部での土圧が増加, 掘削面底部付近では土圧が低下する傾向が確認できる。控え壁により土留め天端の変位を拘束した結果, このような土圧分担に差が生じたものと考えられる。

以上の結果より, 鋼矢板を用いた自立土留めに対して, 控え壁は, 変形要求が厳しい条件への対応策として有効であることが確認できた。

3. 斜め土留め工法の施工例

3.1 施工適用断面の遠心実験による効果検証

3.1.1 実験方法 斜め土留め工法の現場適用に先立ち, 施工対象地盤の遠心模型実験⁵⁾を実施した。Fig. 13に, 適用現場の掘削断面を示す。幅1.6mの小段を設けた最大掘削深さ9.6mの掘削断面である。

模型実験はFig. 14に示すように1/33縮尺の模型地盤を作製し最大33Gの遠心加速度を載荷し, 土留めの変形や

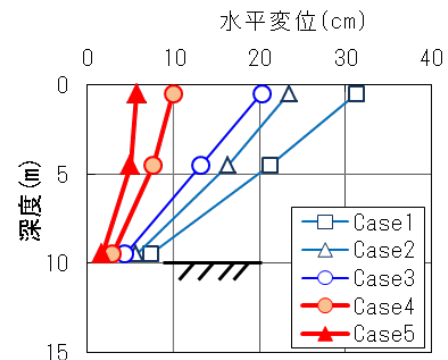


Fig. 9 土留めの水平変位
Lateral Displacement

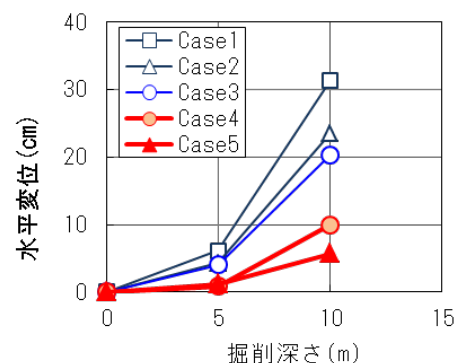


Fig. 10 掘削深さと土留め天端変位
Excavation Depth and Lateral Displacement

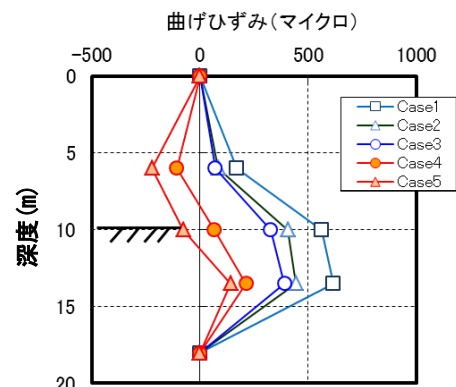


Fig. 11 土留めの曲げモーメント
Bending Moment

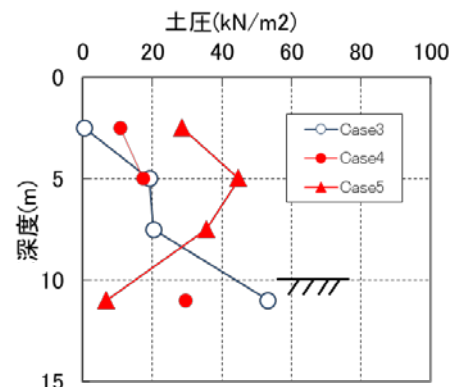


Fig. 12 主働側の土圧分布
Earth Pressure Distribution

土圧分布の検討を行った。適用現場は、ディープウェルにて地下水位を低下させ掘削範囲は地下水位より浅い条件の砂質地盤であったことから、前節で示した乾燥砂を用いた実験方法と同じ土槽、および地盤作製方法で準備した。模型地盤は比較対象用に、直立土留め条件も併せて実験を行った。

実験は、3.3m、5.3m、9.6m 掘削の各段階を模擬するよう順次模型地盤を掘削しては 33G まで遠心加速度を増加させる方法を繰り返した。

3.1.2 実験結果 Fig. 15は掘削深さと土留め上部での水平変位の関係である。掘削深さの増加に応じて変形の差も増加し、実験を行った最大掘削深さにおいては、直立土留め20cmに対して、斜め土留め14cm程度と約30%変形量が小さくなることが確認できた。

Fig. 16, Fig. 17 は、土留めに作用する主働土圧の深度分布である。直立土留めでは、掘削前の状態で計測結果にバラツキが見られるが、図中に付記した $K_0=0.5$ と仮定した静止土圧にはほぼ等しいことから、この装置による土圧の計測が妥当なことが確認できる。掘削部分では土圧が低減し、根入れ部分では静止土圧より増加した。図中には土留めの摩擦角を $\phi/3$ で考慮したクーロン土圧を付記した。掘削部分で計測された主働側土圧はクーロン土圧と同等かやや小さな分布になっている。斜め土留め壁に加わる土圧は、深さに関わらず、静止土圧より減少し、直立土留めの主働土圧に比べて小さな作用荷重になっており、土留めの安定性に寄与していることが土圧の面からも確認できた。

3.2 FEM 土水連成解析によるシミュレーション

地盤と土留めの変形・安定性を確認するために、有限要素法による地盤と地下水の連成挙動の検証解析（解析コード：GRASP3D）を行った。Fig. 18 には、図中に示した地下水位想定での土水連成解析による変形分布例を示す。最終掘削時（GL-10.4m）の土留め壁の変位は最大25mmと算定された。土留め壁の受働側では鋼矢板の根入れ部付近に塑性域が生じた。受働側の抑え地山の施工計画においては、試行解析を行い、健全な領域を見込んだ安定性が確保できる形状を設定し、施工に反映した。

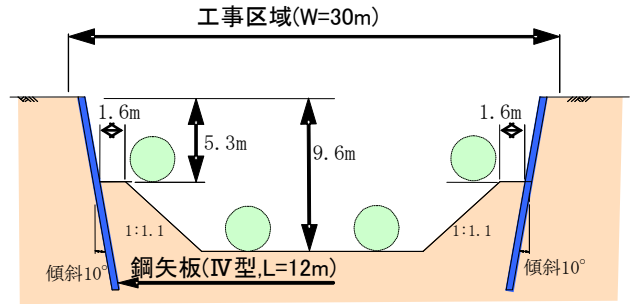


Fig. 13 斜め土留め工法適用現場断面図

Cross Section of Construction Site

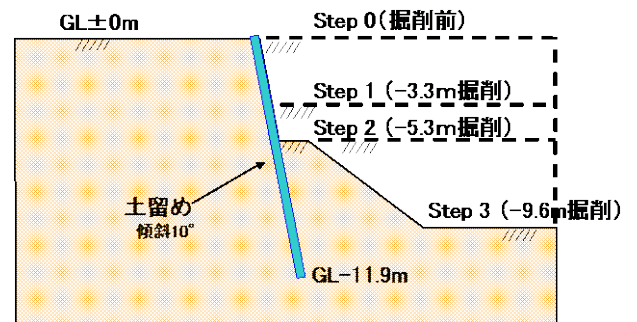


Fig. 14 遠心模型地盤(1/33縮尺)

Cross Section of Centrifuge Model

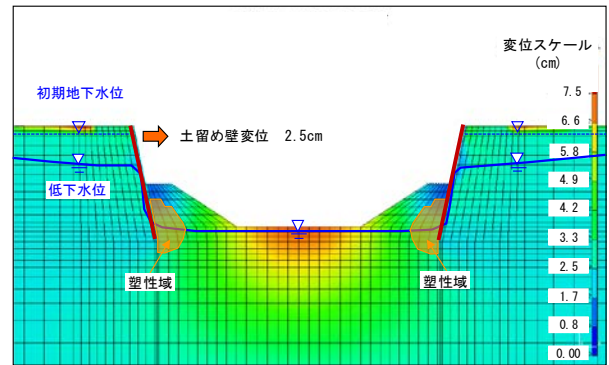


Fig. 18 変位分布(解析例)

Displacement Distribution

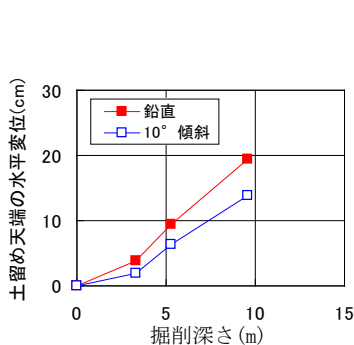


Fig. 15 掘削深さと土留め水平変位
Lateral Displacement of Retaining Wall

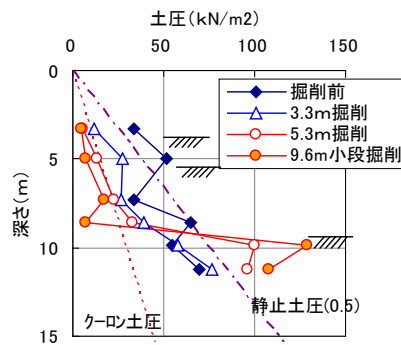


Fig. 16 土圧分布(直立)
Earth Pressure

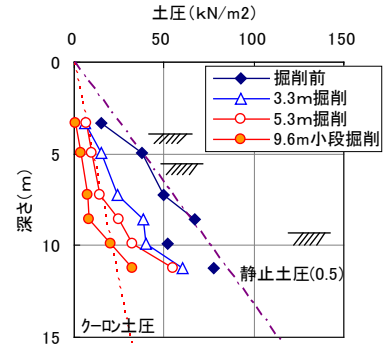


Fig. 17 土圧分布(傾斜10°)
Earth Pressure

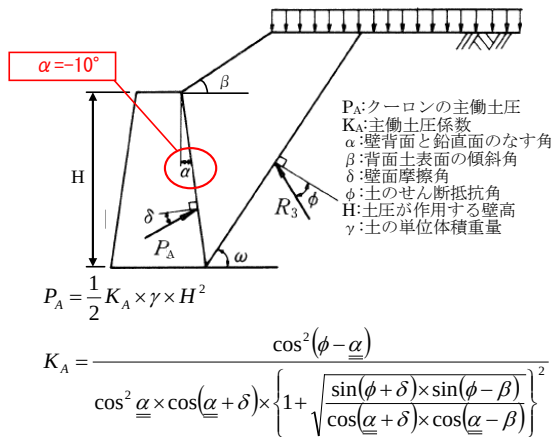


Fig. 19 主働土圧算定式
Active Earth Pressure Calculation

3.3 斜め土留め工法の適用例

適用現場は、既設の設備との敷地競合、短い施工期間などの施工条件から斜め土留め工法が採用⁶⁾された。

適用現場の地盤は、緩い細砂主体の埋め立て地盤（層厚約 12m、N 値 3～5、 $\phi 33^\circ$ ）である。土木工事仮設土留め設計で用いる主働土圧は、一般にランキン・レザール式が適用されているため、土留め壁の傾斜を考慮できない。そこで本設計においては、土留め壁の傾斜を考慮している「道路土工 擁壁工指針」⁷⁾における土圧算出法（クーロン土圧）（Fig. 19）を適用した。遠心模型実験において斜め土留めの土圧低減効果が確認されたため、設計上安全であると判断した。受働土圧についても同様にクーロン土圧を採用した。

上記設計計算の結果、土留め壁の種類は鋼矢板Ⅳ型とし、土留め壁は、直接工事区域の制限と、配管工事に必要な掘削断面の条件から、傾斜 10° として施工し、無事完了した。

Photo 7 に斜め方向の矢板の打設施工状況を、Photo 8 に、斜め土留め工法適用箇所の掘削完了時の全景を示す。

4. まとめ

切ばり、腹起し等の支保工を用いず、主として掘削側の地盤の抵抗によって、土留め壁を支持する自立土留めは、掘削面側に支保工がないため掘削が容易である大きな特徴がある。その特徴をより深い掘削に適用するための一つの工夫として自立土留めを斜めに設置することで、その特徴をより発揮することについて、遠心模型実験、土圧算定の提案、適用現場による確認を行い、以下の知見を得た。

- 1) 矢板土留め壁を斜めに設置することで土留め壁に作用する土圧が減少することを実験的に確認した。
- 2) 矢板土留め壁天端の水平変位量は、土留め壁の傾斜 10° で約 1/2 まで減少する。
- 3) 水平変位を抑制する必要がある施工条件では、対



Photo 7 斜め土留め打設状況
Overall View of Driving Work



Photo 8 斜め土留め掘削完了状況
Overall View of Excavation Completed Site

策として控え壁は有効である。

- 4) 適用現場に斜め土留めを採用するための設計手法として、弾塑性解析でクーロン式を用いて壁面の傾斜を考慮するという土圧算定法を提案した。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路土工 仮設構造物工指針，日本道路協会，（2001）
- 2) 高橋，杉江，嶋田，松本：斜め壁を用いた自立土留めの開発，大林組技術研究所報，No.74，（2010）
- 3) 遠心模型実験グループ：遠心模型実験装置の活用事例，大林組技術研究所報，No. 66，pp.121～124，（2003）
- 4) 日本建築学会：山留め設計施工指針，日本建築学会，（2002）
- 5) 嶋田，高橋，前田，杉江：鋼矢板斜め土留め工法の実施校を模擬した遠心模型実験，土木学会第66回年次学術講演会，（2011）
- 6) Shimada, Y., et al.: Design and Construction of Inclined-Braceless Excavation Support Applicable to Deep Excavation, Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris (2013)
- 7) 日本道路協会：道路土工 擁壁工指針，日本道路協会，（1999）