

# 新機構による柱列壁造成システムの開発と成果 大深度・大口径の高精度施工を目指してー

本田周成<sup>1</sup>・高瀬義行<sup>2</sup>・橋本聡<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 大成建設株式会社 土木本部 土木技術部 (〒163-0606 東京都新宿区西新宿1-25-1)

<sup>2</sup>大成建設株式会社 土木本部 土木技術部 (〒160-0606 東京都新宿区西新宿1-25-1)

現在、都市部地下空間の高度利用が図られようとしているなかで、大深度の土留止水壁を高精度に施工できる技術が求められている。そこで、従来の原位置攪拌工法の課題を解消した新機構による施工機械(UD-HOMET)の開発に取り組み、実用化した。大成建設は、この新工法(UD-HOMET工法)を中之島新線事業における開削工事影響調査工事に提案し、採用された。

本文は、UD-HOMET工法の概要と開発経緯、施工事例及びその成果について紹介するものである。

**キーワード:** ソイルセメント連続壁工法, S MW工法, 中空油圧モータ

UD-HOMET工法, 連続計測システム, 大深度, 大口径, 高精度

## 1. はじめに

従来のソイルセメント連続壁工法は、大深度の施工では曲がりやすく、ラップずれによる不連続部の発生が懸念されているので、大深度施工における土留壁工法の選定では、RC連続壁等の他工法が採用される場合が多く見られた。そこで、従来のソイルセメント連続壁工法における課題を解消し、大深度・大口径の施工を高精度に行う新工法を開発し、実用化した。

本文は、新工法の開発経緯及びその概要と新工法の施工事例を元に、開発の成果について紹介するものである。

## 2. 新工法の開発

### (1) 従来の技術

従来のソイルセメント連続壁工法における代表例には、SMW工法(Soil Mixing Wall)が挙げられる。この工法での精度管理システムでは、DAMシステムがあり、この計測システムは、任意の深度における掘削変位を、混練翼の回転を止め、傾斜計の安定を待った後に測定するもので、掘削変位をリアルタイムに把握できるものではなかった。このため、掘削の曲がり始めを検出することが不可能であった。

また、施工機械の機構としては、リーダ上部に減

速機及び多軸装置を装備し、地上部からオーガヘッド及び混練軸を回転させるトップドライブ方式である。本機構では、大深度になるにしたがい、掘削地盤と駆動部の離隔が大きくなり、掘削地盤に駆動部の力を100%伝えることはできない。掘削方式としては、地上部からオーガヘッドと攪拌翼を押し下げるものである。

大深度のSMW工法での掘削が曲がりやすい原因には、前述のような要因が想定される。

### (2) 新工法の開発コンセプト

大深度でのSMW工法の課題を解消する新工法の開発に当たり、以下のコンセプトを元に開発を進めた。

「大深度、大口径のソイルセメント柱列

壁を高精度に施工できる新工法の開発」

まず、SMW工法の課題を解消するために、連続的に掘削精度を検出できる連続計測システムの検討を行った。掘削作業を実際に行う場合には、常時、掘削精度を把握し、曲がり始めの段階で迅速に対処することが高精度施工の実現に最も重要であると考えた。次に、新しい駆動機構の検討を行った。施工機械の駆動機構としては、従来のトップドライブ方式から脱却し、駆動部を掘削地盤の近傍に設置することで、効率良く掘削できる新しい駆動機構の実現が必要であると考えた。

このような開発方針のもと、連続計測システムと新しい駆動機構の開発に着手した。

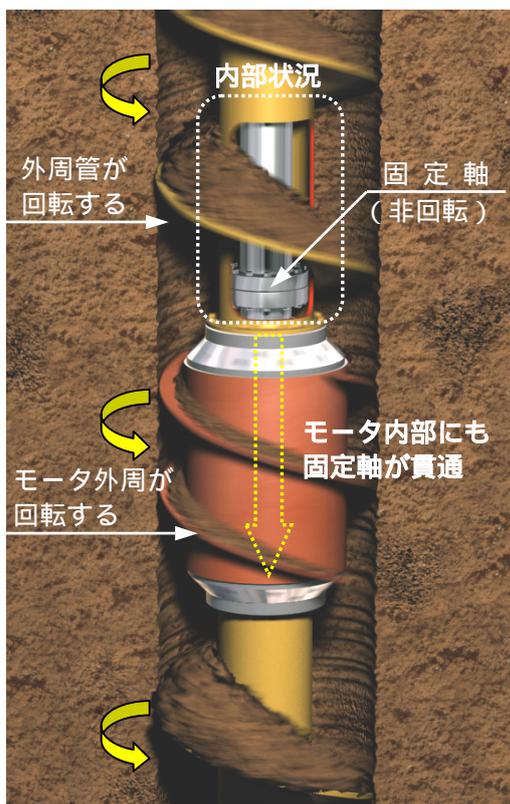


図 - 1 アウターモータ概要図



図 - 2 UD - HOMET工法概要図

### (3) 駆動機構の開発

減速機及び多軸装置に代わる新しい駆動部として、2種類の中空油圧モータ（インナーモータ、アウターモータ）の開発を行った。（特許第3484576号）

#### a) インナーモータ

インナーモータとは、モータシャフトが回転する一般的なモータ機構と同様であり、内部に土砂シールを備えており、土中及び水中での使用が可能な構造となっている。

#### b) アウターモータ

アウターモータとは、モータ中空部を貫通した固定軸（非回転）の周囲をモータ外周が回転する機構であり、内部に土砂シールを備えており、土中及び水中での使用が可能な構造となっている。

#### c) アウターモータの利点

混練翼にアウターモータを設置することが可能となり、掘削とともに土中を掘り進む。このことにより、掘削深度が深くなっても、モータと掘削地盤の距離は変化せず、大深度の施工であっても、モータトルクを効率良く地盤に伝達することができる。

スクリュを装備したモータ外周が回転するので、混練翼にモータを設置しても、排土を阻害しない構造となる。

回転機構としては、貫通した固定軸の周囲をモータ及び外管（混練翼）が回転する機構となる。固定軸に傾斜計や計測ケーブルを設置することで、計測機器が外周の回転影響を受けない構造となる。

図 - 1 にアウターモータ概要図を示す。

上記の特徴を持つ中空油圧モータを使用することにより、SMW工法の課題である連続計測システムと高精度施工が可能な掘削機構を実現した。

以下に、新工法であるUD - HOMET工法の概要について述べる。

## 3. UD - HOMET工法

### (1) 工法概要

従来の原位置攪拌工法における課題を解消した新工法として、UD - HOMET工法を開発し、実用化した。

この「UD - HOMET工法」は、地中駆動（Underground Drive）方式を中空油圧モータ（Hollow Motor）で実現した（Execution）新しい技術（Technology）である。駆動部（中空油圧モータ）が掘削とともに地中を推進する機構としたことで、従来の常に駆動部が地上にあるトップドライブ方式から脱却し、スクリュを装備した中空油圧モータが土中を掘り進むシステムである。

本工法では、高精度を維持した施工が可能となり、モータ中空部を貫通した固定軸に静電容量式傾斜計を取付け、通信ケーブルを敷設することで、施工中にリアルタイムで掘削変位を監視できる連続計測が可能となる。

図 - 2 にUD - HOMET工法の概要図を示す。

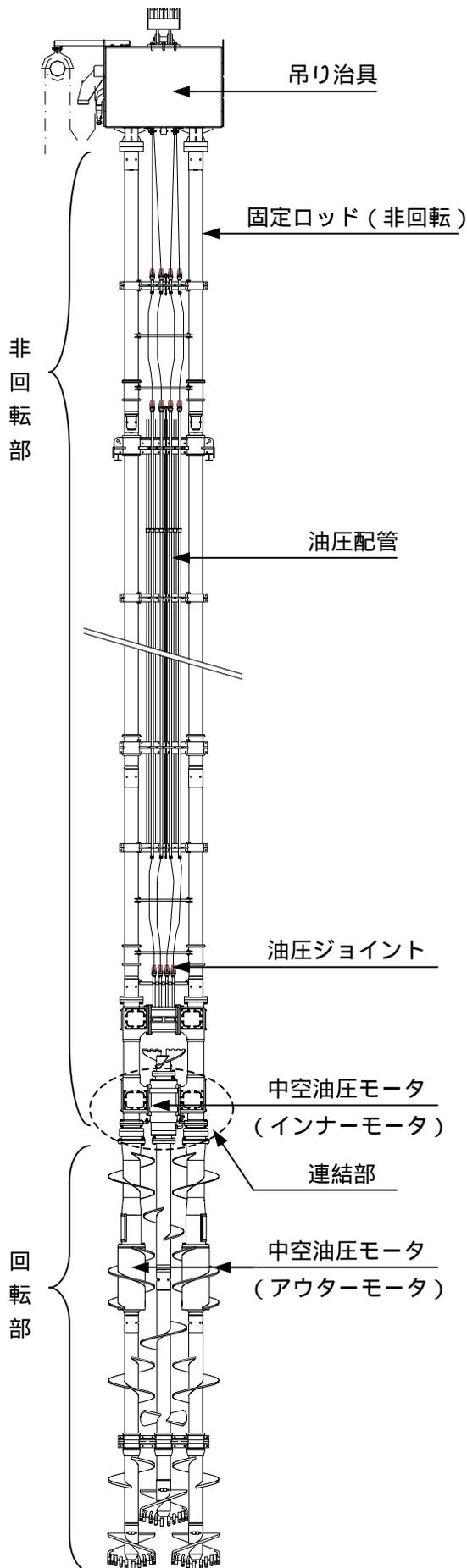


図 - 3 UD - HOMET工法施工機械図

## (2) 駆動機構

本工法は、従来の地上にあった駆動部をスクリュ部に設置し、土中に推進させるシステムである。掘削時は、駆動部と掘削地盤の距離が変化せず、駆動部の力を100%地盤へ伝達することができる。このことにより、SMW工法では錐が振れていたが、本工法では錐が振れない掘削を行うことで、高精度の施工が可能となる。また、掘削効率が高いため、SMW工法では先行削孔を必要とする地盤であっても、土質条件により先行削孔を省くことができる。

さらに、地上から貫通した固定軸に傾斜計や計測ケーブルを設置することにより、リアルタイムに掘削精度を監視することができ、SMW工法では不可能であった連続計測を可能にした。

図 - 3 にUD - HOMET工法の施工機械図を示す。駆動部は、外周が回転するアウトターモータと中央のシャフトが回転するインナーモータを使用する。

回転部のモータ配置は、掘削時に先行する左右軸にアウトターモータを使用している。アウトターモータを使用することで、掘削時の排土を円滑に行うとともに、左右軸には傾斜計を設置し、掘削変位を計測する。左右軸を追従する中央軸には、インナーモータを使用し、三軸の連結部に設置している。

モータトルクは、

- ・左右軸 アウトターモータ：7.0 [t・m]
- ・中央軸 インナーモータ：4.8 [t・m]

であり、モータの回転数は0～30 [r.p.m.] で、自由に調整可能である。

油圧モータは、プログラムにより回転方向の制御が容易であり、この特長を利用し、正回転と逆回転を一定周期で繰り返す揺動制御を付加している。例えば、5秒間正回転した後に3秒間逆回転する動作を繰り返すという制御である。この揺動制御を利用し、玉石が点在する地盤においても、玉石を砕きながら掘削することができる。揺動制御の効果については、300mm～500mmの玉石を混入した模擬地盤を作成し、実際に掘削することで、その効果を確認した。

回転部の上部に接続する固定ロッドは、左右が回転しないロッドで、中央に中空油圧モータに作動油を供給する油圧配管が設置されている。実施工では、固定ロッドを順次、接続するとともに、油圧配管の接続も行う。

油圧配管の接続では、作動油の通過抵抗の少ないワンタッチカップラを使用し、1本ずつ接続を行う。

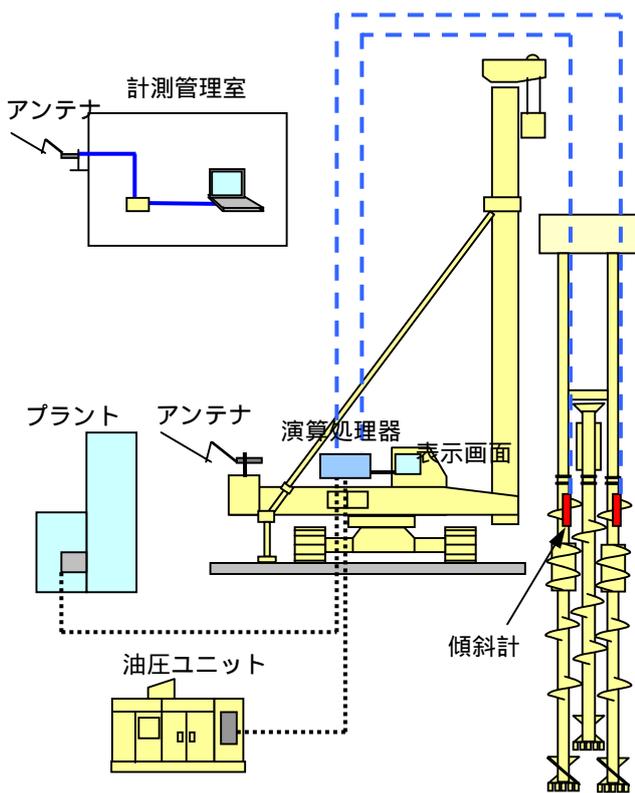


図 - 4 連続計測システム概要図

### (3) 連続計測システムの概要

連続計測システムは、静電容量式傾斜計を左右の錐の固定軸に設置し、錐の傾斜角と同時計測している掘削深度データを利用し、変位量を算出するものである。図 - 4 に連続計測システムの概要図を示す。

地上の基準位置から変位量を深度方向へ順次加算し、この変位量を現在の錐先端における X Y 方向の変位量として、計測画面に表示する。

また、本システムは掘削精度だけでなく、

- ・中空油圧モータの駆動データ
- ・掘削速度
- ・錐先端荷重
- ・セメント系懸濁液の注入量

を合わせて計測でき、ベースマシンのオペレータ室に伝達できる。このことにより、掘削状況と掘削精度をリアルタイムに監視することができ、施工状況の把握が容易になる。なお、無線で近傍に設置した計測室へデータを送信することにより、計測室でも同様の管理を行うことができる。

管理画面には、以下に示す 3 種類のデータ表示画面がある。

#### a) 深度方向に対する掘削変位量

図 - 5 に表示画面を示す。表示画面は、掘削深度での左右軸の X Y 方向の変位である。画面には掘削深度毎の変位量が表示されるので、ソイル柱列壁の全体的変位を把握できるとともに、掘削の曲がり傾向を把握できる。

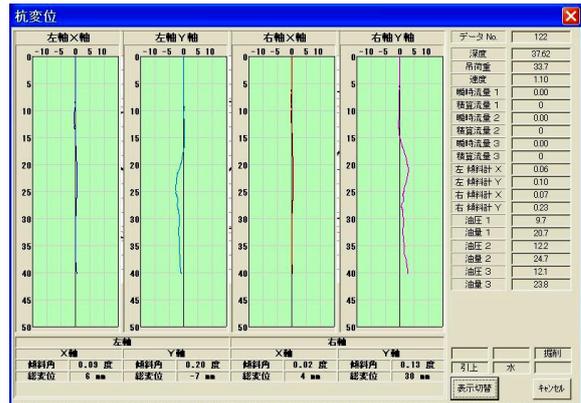


図 - 5 深度方向に対する掘削変位量の表示画面

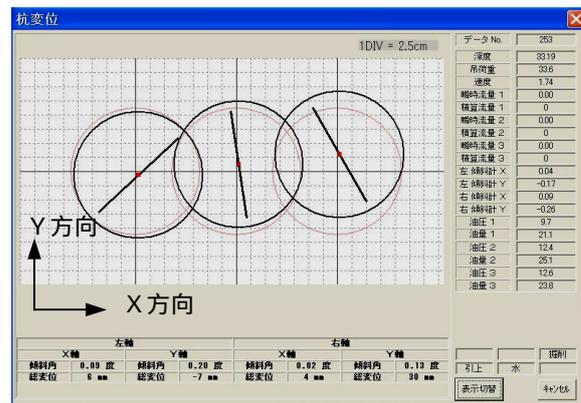


図 - 6 掘削平面位置



図 - 7 施工データ表示

#### b) 掘削平面位置

図 - 6 に表示画面を示す。表示画面は、錐先端位置が設計位置に対して、どのような位置にあるかを確認できる。

#### c) 施工データ表示

図 - 7 に表示画面を示す。表示画面は、掘削深度、セメント系懸濁液の注入量、中空油圧モータのトルクを時間軸で表示するものであり、深度毎の注入量の把握や各深度におけるモータ負荷を把握することができる。

表 - 1 従来工法と比較したUD - HOMET工法の特長

比較項目	SMW工法	UD - HOMET工法	効 果
駆動部の位置	常に地上	掘削とともに土中に推進	モータトルクが地盤にダイレクトに伝わり、精度の良い掘削が可能 駆動部が地中にあるため、騒音が少ない
回転機構	軸全体が回転する	固定軸を有する	回転しない固定軸を利用して、連続計測が可能
機械重心位置	高い	低い	重い駆動部が地中にあるため、低重心となり、ベースマシンの安定性が高い
姿勢制御方法	ターニング	回転数、回転方向により制御	各軸が個別に制御できるため、各軸の回転数、回転方向を変化させ、変位の修正を行う

#### (4) UD - HOMET工法の特長

従来工法（SMW工法）と比較したUD - HOMET工法の特徴を表 - 1 に示す。駆動部が地中にあることで、高精度施工が可能であり、連続計測システムを併用することで、さらに精度の高いソイル柱列壁を造成することができる。

さらに、ベースマシンとして三点式杭打機以外にも、汎用クレーンを使用することにより、施工位置からベースマシン設置までの離隔を取ることができ、施工位置に対してベースマシンが正対する必要がない。

### 4 . UD - HOMET工法による施工事例

#### (1) 工事概要

本工事は、中之島新線事業における最適な土留工法を選定するために行われた調査工事である。実際の工事区間内で先行して4種類の土留壁を造成し、各土留壁の変位や背面地盤への影響及び止水性能等の設計上の要素と施工時間や施工精度及び騒音等の施工上の要素を確認し、比較・検討するものである。

4種類の土留工法は、SMW工法、UD - HOMET工法、SC連続壁工法、ONS - 8工法である。

図 - 8 に調査工事の標準断面図を示す。

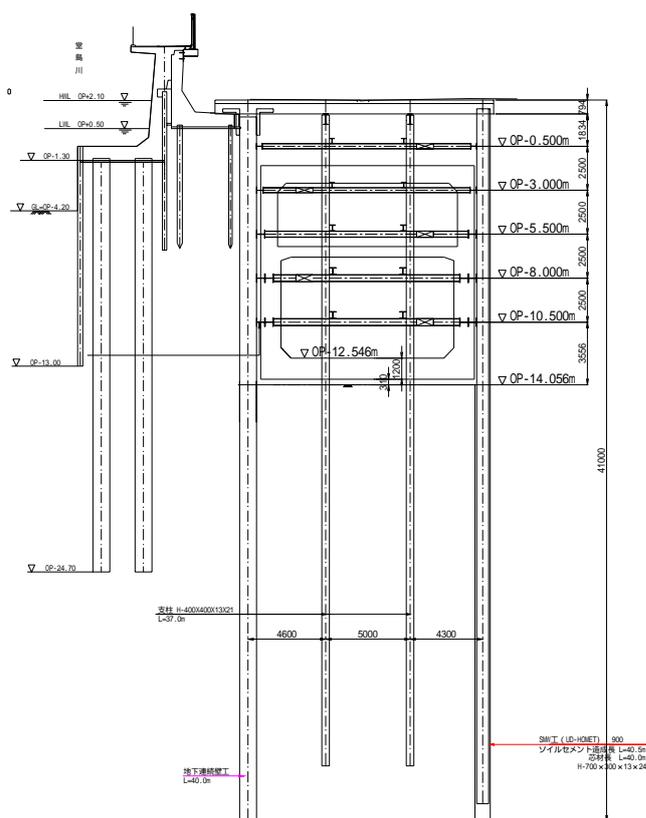


図 - 8 調査工事の標準断面図

#### (2) 工事数量

SMW (従来工法) 9set

削孔径 900 @600 造成長 40.5m

応力材 H700×300×13×24 L=40.0m

施工延長 10.8m

施工数量 437.4 m<sup>2</sup>

先行削孔 900 L=40.5m 10本

DAM計測 1式

UD - HOMET (新工法) 15set

削孔径 900 @600 造成長 40.5m

応力材 H700×300×13×24 L=40.0m

施工延長 17.4m

施工数量 704.7m<sup>2</sup>

応力材の長さは床付け深度と関係なく、各工法における応力材の挿入性を確認するために、造成長とほぼ同じ長さとしている。

SMW工法ではDAM計測を実施し、UD - HOMET工法では連続計測を行った。

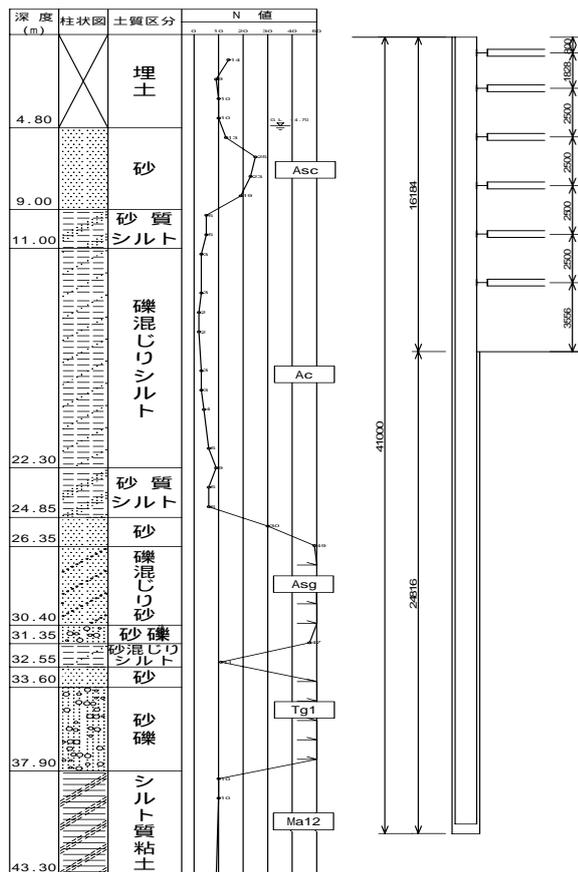


図 - 9 調査工事の土質柱状図

### (3) 土質概要と調査工事の必要性

中之島新線事業で計画している開削部の床付けは、GL-16m～GL-30mと大きく変化している。事業区間の地層は、厚く軟弱な沖積粘土層の下に硬質の沖積砂礫層、天満礫層が続き、強度の急変する地層構造である。また、一部の区間では、これらの硬質な砂礫層を貫き、その下の遮水粘性土層まで土留壁を築造する必要がある。当該砂礫層は固結度が高く、被圧滞水しているため、施工精度不良による漏水は土留壁の破壊につながりかねない。このことにより、土留工法の選定の正否が事業に大きな影響を与えることから、4工法の比較検討を行う調査工事を実施した。図-9に調査工事の土質柱状図を示す。

## 4. UD-HOMET工法による成果

### (1) 施工時間

UD-HOMET工法では、従来工法(SMW)に比べ、掘削精度の向上により応力材建込み時間が短縮された。削孔、造成時間が長くなっているが、これは施工期間中に実施したUD-HOMET工法見学会の整備時間等が含まれているためである。

表-2に示すとおり、UD-HOMET工法は、先行削孔を省けるなど、先行削孔併用方式のSMW

表 - 2 各工法の1 set当りの施工時間

	先行削孔	削孔造成	応力材建込み	合計
SMW	35	42 DAM計測	23 (2本)	100
UD-HOMET	-	55 連続計測	15 (2本)	70

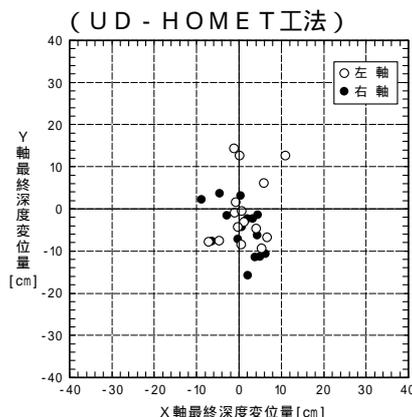
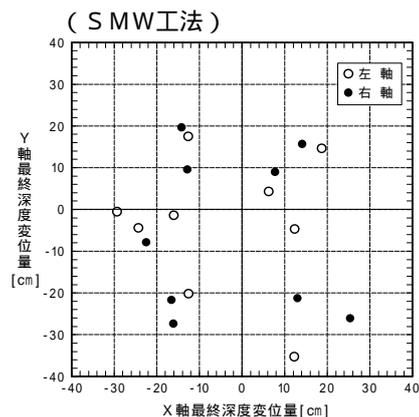


図 - 10 40m付近における掘削変位の分布図

工法に対して、約30%の工程短縮が可能となった。

### (2) 掘削精度

SMW工法では、掘削精度は通常1/150～1/200であり、砂礫層では精度が多少低下する。

本工事では、深度40mの掘削・造成をUD-HOMET工法により施工し、その平均掘削精度は1/400～1/500であった。

図-10にSMW工法とUD-HOMET工法による深度40m付近における掘削変位の分布図を示す。SMW工法は変位のばらつきが大きいですが、UD-HOMET工法は中心部分に集中しており、掘削精度が良いことがわかる。

表 - 3 30m地点における騒音測定結果

暗騒音	SMW	UD - HOMET
70 [dB]	75 [dB]	70 [dB]

(3) 騒音

施工機械から30m離れた地上面において、夜間に騒音測定を行った。測定結果を表-3に示す。

UD-HOMET工法は暗騒音と同等であり、SMW工法より騒音が低いことが確認できた。

(4) 壁面状況及び土留壁の変位

掘削坑内における土留壁からの漏水は、SMW工法、UD-HOMET工法ともに目視確認では、認められなかった。

また、掘削に伴う土水圧による土留壁の変位量は、

- ・設計値 最大 32.9mm (深度 GL-16.0m)
- ・SMW 最大 23.8mm (深度 GL-16.0m)
- ・UD-HOMET 最大 21.7mm (深度 GL-16.0m)

であった。

(5) 土留壁の遮水性能について

a) 遮水性能評価フロー

事前のシミュレーション解析 (FEM浸透流解析) により、土留壁の止水性の違いによる揚水量と土留壁内外の水位低下量を算出し、土留壁構築後の揚水試験による揚水量と水位低下量の関係から土留壁の遮水性能を評価する。

b) 揚水対象層

揚水対象となる滞水層は、Asg層とTg1層である。両滞水層は土留壁が根入れされるMa12層の上層にあり、土留壁で遮水される滞水層である。これらの滞水層より揚水し、揚水量と土留坑内と坑外の水位低下量より土留壁の遮水性能を評価する。

Asg層 GL-21.7~31.3m: 砂・礫混じり砂層

Tg1層 GL-32.5~37.8m: 砂・砂礫層

c) 事前揚水試験とシミュレーション解析結果

事前揚水試験により、表-4に示す揚水対象層の水力定数が得られ、FEM浸透流解析により土留壁造成後の揚水試験における揚水量と水位低下量及び土留壁の透水係数の関係を求めた。解析結果を図-11に示す。土留壁造成後の揚水試験の結果を図-11のグラフ上にプロットし、土留壁の透水係数を推定する。

d) 遮水性能の評価

山留壁造成後の揚水試験

(Asg層)

揚水量: 0.024m<sup>3</sup>/min

水位低下: 掘削坑内の水位が時間に対して直線的に低下した。

水位低下量が13m以上となっても定常状態とならない。

背面地盤: 水位低下量は0m

表 - 4 事前揚水試験

	揚水量 m <sup>3</sup> /min	透水係数 cm/sec	透水量係数 m <sup>2</sup> /min	影響圏半径 m
Asg	0.50	$8.15 \times 10^{-2}$	0.47	750
Tg1	0.82	$2.10 \times 10^{-1}$	0.67	650

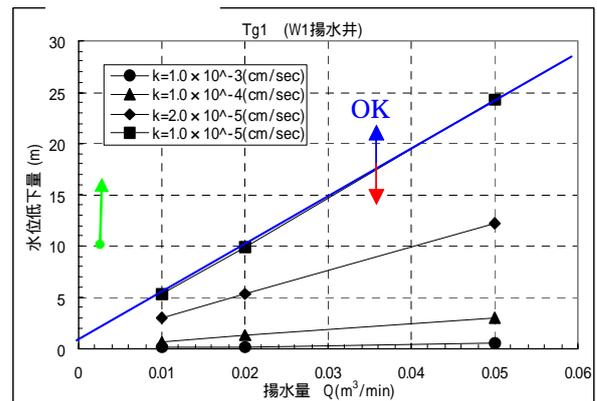
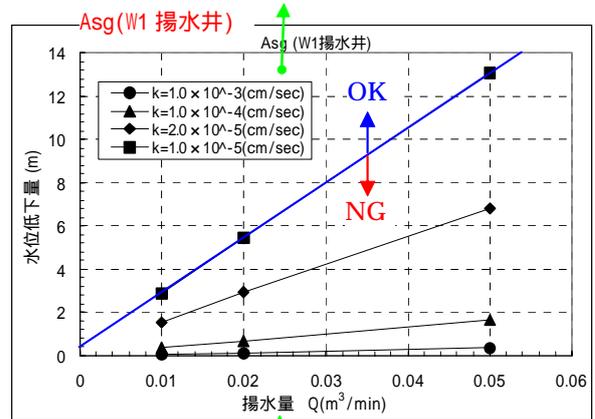


図 - 1 1 揚水試験による浸透流解析結果

(Tg1層)

揚水量: 0.002m<sup>3</sup>/min

水位低下: Asg層の揚水時に水位が低下しており、揚水量を下げた。

掘削坑内の水位が時間に対して直線的に低下した。

水位低下量が10m以上となっても定常状態とならない。

背面地盤: 水位低下量は0m

結果を図-11にプロットする。この結果から、土留壁の透水係数は $1 \times 10^{-6}$ cm/sec以下であると推定した。

表 - 5 供試体の透水係数(cm/sec)

地層	SMW	UD-HOMET
Asc	$2.5 \times 10^{-8}$	$2.3 \times 10^{-8}$
Ac	$6.3 \times 10^{-8}$	$8.3 \times 10^{-8}$
	$5.0 \times 10^{-8}$	
Asg	$2.7 \times 10^{-8}$	$2.8 \times 10^{-8}$
	$1.7 \times 10^{-8}$	
Tg1		$3.3 \times 10^{-8}$

表 - 6 供試体の圧縮強度(kN/m<sup>2</sup>)

地層	SMW	UD-HOMET
Asc	2139	1306
Ac	1400	1782
Asg	2657	3726
Tg1		3004

#### e) ボーリングコアの透水係数及び圧縮強度

土留壁造成完了後にコアボーリングを行い、採取した供試体の透水試験及び圧縮強度試験を行った。結果を表 - 5 , 表 - 6 に示す。圧縮強度は500kN/m<sup>2</sup>以上である。

#### 5 . おわりに

本工法は、2003年8月から開発に着手し、約1年という短い期間の中で、調査工事を行うに至った。

今後、本工法が普及していくためには、以下の課題について検討する必要があると考える。

施工機械の保守の簡素化

油圧配管接続作業の簡易化

掘削精度修正手法の確立

クレーン施工による適用範囲の拡大

大深度化が進む都市部での施工やベースマシンが近寄れない等の特殊条件の施工に際して有効な工法であり、適用範囲の拡大が一層望まれるとともに、本文が同種工事の一助になれば幸いである。