

新型SMW工法(UD-HOMET)の開発

金子研一¹・荒井政男²・鈴木庫雄²・藤谷俊実²
柴原克巳³・林 清史³・伊藤俊夫³・遠藤堅一⁴

¹正会員 工博 大成建設株式会社 技術センタ土木技術開発部 (〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町344)
²正会員 大成建設株式会社 土木本部機械部 (〒160-0004 東京都新宿区一丁目25-1)
³正会員 成幸工業株式会社 技術本部 (〒540-0008 大阪市中央区大手前一丁目7-24)
⁴成和機工株式会社 基礎技術部 (〒160-0004 東京都新宿区一丁目25-1)

近年、地下構造物の建設が大深度化するのに伴い、従来のSMW工法においても、大深度化に適応するための改善が求められている。新しく開発した技術は、中空モータを用いて、地中のオーガ先端部でオーガを駆動するもので、ビットに確実にトルクを伝え、掘削深度、掘削径などの掘削性能を改善した。オーガとモータを一体にした掘削装置を吊り下げる軸が回転しないことで、計測装置やケーブルを軸に固定することができ、掘削中の連続計測が可能になった。加えて、3本のオーガの回転方向を個別に変更できることから、鉛直精度が向上した。また、ベアスマシーンにクレーンが使用できることから、異なる施工基面での施工が可能になるなど、多様化するニーズに応えられる。

キーワード: 柱列式連続壁, SMW, 土留め壁, 中空モータ, 原位置混合攪拌

1. はじめに

遮水性が要求される土留め壁の代表として、鋼矢板壁、柱列式連続壁、地中連続壁があげられる。大雑把な分類ではあるが、浅深度は鋼矢板、大深度に対しては地中連続壁、その中間が柱列壁という住み分けがなされていた。柱列式連続壁の代表として、SMWがあげられ、技術的に地中連続壁とSMWの分岐点は30m～35m付近にあった。

近年、地中連続壁は公共事業の減少に伴う大規模プロジェクトの減少と、加えて工事費が高いことから、施工例が少なくなってきた¹⁾。これに対し、SMWは精度監理システムなど、技術開発が進み、35m以深の土留め壁にも多く実施されるようになった。地下ダムにおいては60mを超える実績が多数ある。

しかし、SMWを大深度に適応した場合、技術的に改善すべき課題がある。特に、大深度における柱列壁の施工は曲がりやすく、ラップずれによる不連続部の発生が懸念されることがあげられる。

新しく開発した新型SMW工法(以下UD-HOMETと呼ぶ)は、従来のSMWを大深度化に適応させるため、大深度掘削における鉛直性、施工時間の短縮に関して改善したものであり、日本建設機械

化協会より建設機械化技術・技術審査証明書をいただいたので、その内容についてここに報告する。

2. SMWの課題

SMWで40m以深を掘削する場合の技術課題を以下に述べる。すでに述べたように地下ダムの実績から、巨礫地盤や硬質の岩盤(国内の地下ダムは30N/mm²程度の琉球石灰岩である)でなければ60mを掘削する能力はある。

しかし、細長いオーガが一度曲がり始めると、修正することは困難である。原因の一つはオーガの剛性が小さいことであり、そして掘削方向を制御する技術が無いことにある。これに対処するために、リアルタイムの精度管理をすることで、早めに曲がりの傾向を把握し、掘り直すこと(ターニングと呼ばれる)により精度を修正するといった方法がなされている。

現行の精度監理システムは、オーガの先端に傾斜計が装着されていて、掘削深度と傾斜角度からオーガ先端の位置を算出するものである。オーガが回転するために、同システムでは掘削を停止した状態で測定を行わねばならない。このため、計測を頻繁に

行うことができず、例えば掘削深さ 5 m おきに測定すると曲がり始めに即時に対応できない場合がある。このような理由で、掘削中に連続して計測できることが望まれている。

また、従来の SMW は標準積算資料²⁾によれば、N 値が 50 以上の締まった土質、直径 100mm 以上の玉石が混入している砂礫の土質、あるいは軟岩においては先行削孔を必要とする。これも鉛直精度を維持するための措置である。当然、先行掘削を行った場合は、サイクルタイムが長くなる。

3. UD-HOMET

(1) 概要

UD-HOMET とは、地中駆動 (Underground Drive) 方式を中空モータ (Hollow Motor) で実現した (Execution) 新しい技術 (Technology) である。従来の駆動部が常に地上にあるトップドライブ方式から脱却し、スクリーを装備した中空モータが土中を掘り進む機構としたことで、大深度でも確実にトルクが伝わり、掘削攪拌ができる。さらに、モータ中空部を貫通した固定軸を利用することで、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により、高精度の削孔が可能となった。

掘削の状況を図-1 に示す。ベースマシーンから 2 本の固定軸で掘削装置を吊り下げて掘削する。原位置土とセメントミルクを掘削混練後、オーガを引き上げながら再度混練し、芯材を建て込み、地中に壁体を造成する手順は、従来の SMW 工法と同じである。

(2) 中空モータ

本工法はオーガの駆動に中空モータを使用する。中空モータとは、通常のもータの回転軸を中空の円筒にしたものである。モータの中心部が空洞であるため、内部にミルク等の流体を通過させることが可能である。このような中空軸を回転させるモータをインナーモータと呼ぶ。

これに対し、アウターモータと呼ぶ中空モータを新しく開発した。貫通するシャフトを固定軸とし、その周囲をモータ本体が回転するものである。

本工法では、混練のためのオーガを固定軸に被せる、つまり二重管構造にし、アウターモータでオーガを回転させるようにしている。また、アウターモータの外側にもオーガの翼を装着している。掘削した土砂が上方に廃土されるのを中空モータが阻害し

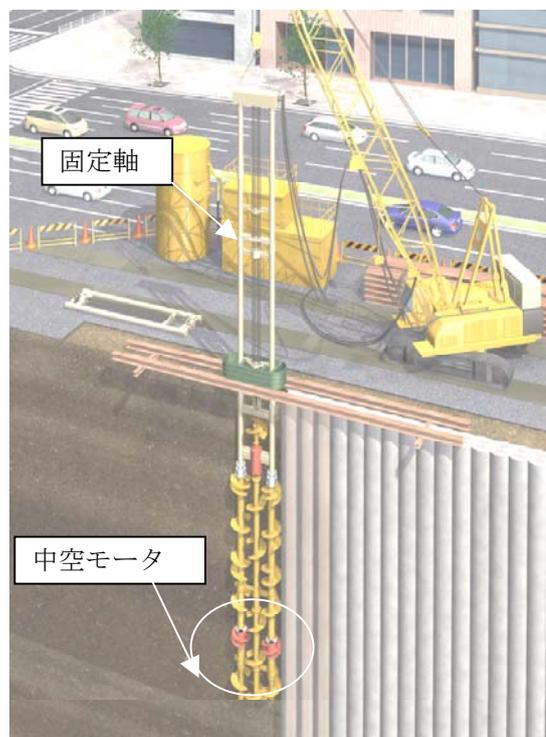


図-1 UD-HOMETによる掘削の状況

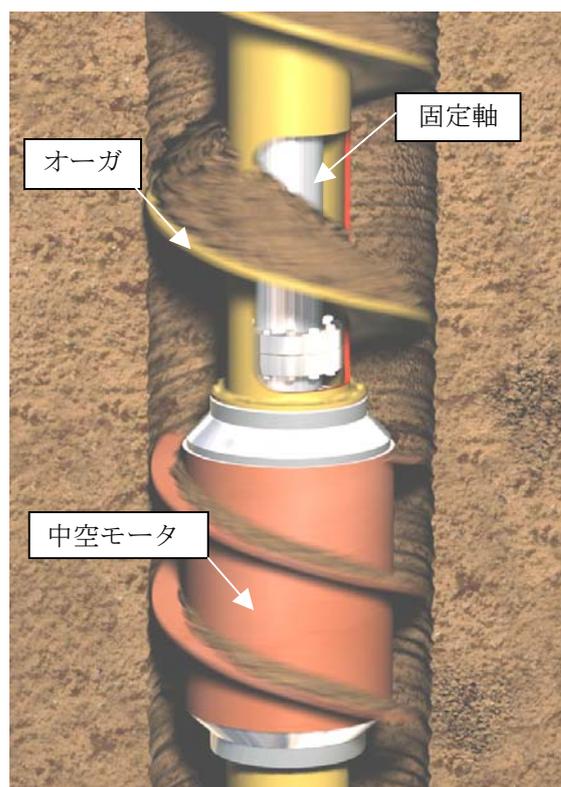


図-2 中空モータ (アウターモータ)

ないためである。アウターモータの構造を図-2 に示す。

(3) 掘削装置の構成

掘削装置の基本的な構成図を図-3 に示す。掘削装置は、従来の SMW 工法と同様に 3 本の軸で構成

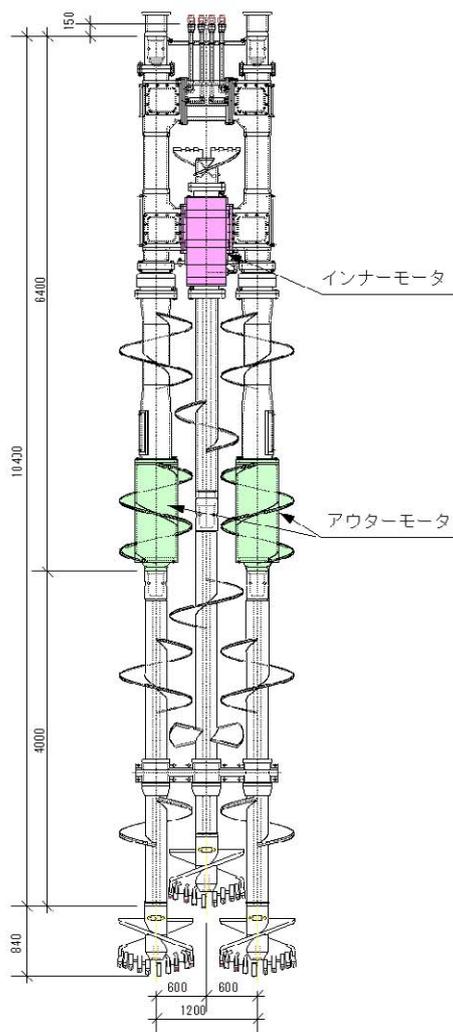


図-3 掘削装置の基本構成

される。ここでは、オーガヘッドの直径は 90cm であり、軸間の距離は 60cm である。

掘削装置の上方において、両脇の固定軸間にインナーモータを設置し、中央のオーガを回転させる。中央のオーガには下端だけでなく上端にもオーガヘッドを装備する。これは掘削装置の引き上げ時の抵抗を低減させるためである。

両側の固定軸にはアウターモータを装着し、上方の二重管構造のオーガと下方のオーガを回転させる。

中空モータは油圧駆動であり、油圧ホースは 2 本の固定軸間に露出して配置され、掘削装置部より下は固定軸内に収納される。

(4) ベースマシン

本工法で使用するベースマシンは、一般汎用機を使用する。掘削長に対するリーダ長さ、装備質量、装備を含めた重心位置（安定度）により選定する。

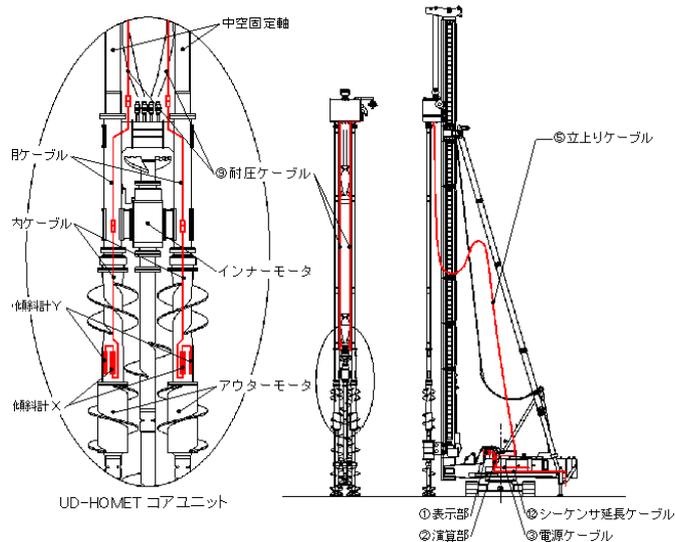


図-4 計測機器およびケーブル配置状況

参考までに 40m の掘削（リーダ長 30m）では日本車輛製 DH608-120M M90D, 45m の掘削（リーダ長 33m）で DH658-135M M95D を使用している。

掘削装置としてオーガヘッドおよび中空モータ、オーガを一体にし、吊り下げ軸を固定軸にしたため、ベースマシンとしてクレーンを使用することも可能である。吊り下げ軸は専用の振れ止め装置で固定する。

工事規模、敷地条件および周辺環境条件に応じて、最適な機械を選定できる。クレーンの選定はオーガの装備長、同装備質量、作業半径、ブーム長さ、許容吊り荷重（引抜き荷重として 50 t 程度）を勘案し、クレーンの定格総荷重表により選定する。通常、100 t または 150 t 以上のクレーンが必要である。

油圧式クレーン、またはクローラクレーンを使用すると、施工基面が異なる場合や三点式杭打機では困難な狭い敷地内での施工が可能になる場合がある。

4. 計測

(1) 連続計測システム

従来の SMW と異なり、固定軸と呼ぶ地上からオーガヘッドまで貫通している回転しない軸を有するため、傾斜計や計測ケーブルを軸に設置することが可能になった。

オーガ先端の変位量を計測するために、4 つの静電容量式傾斜計を左右アウターモータの上部の固定軸に、それぞれ X 軸方向と Y 軸方向に設置する

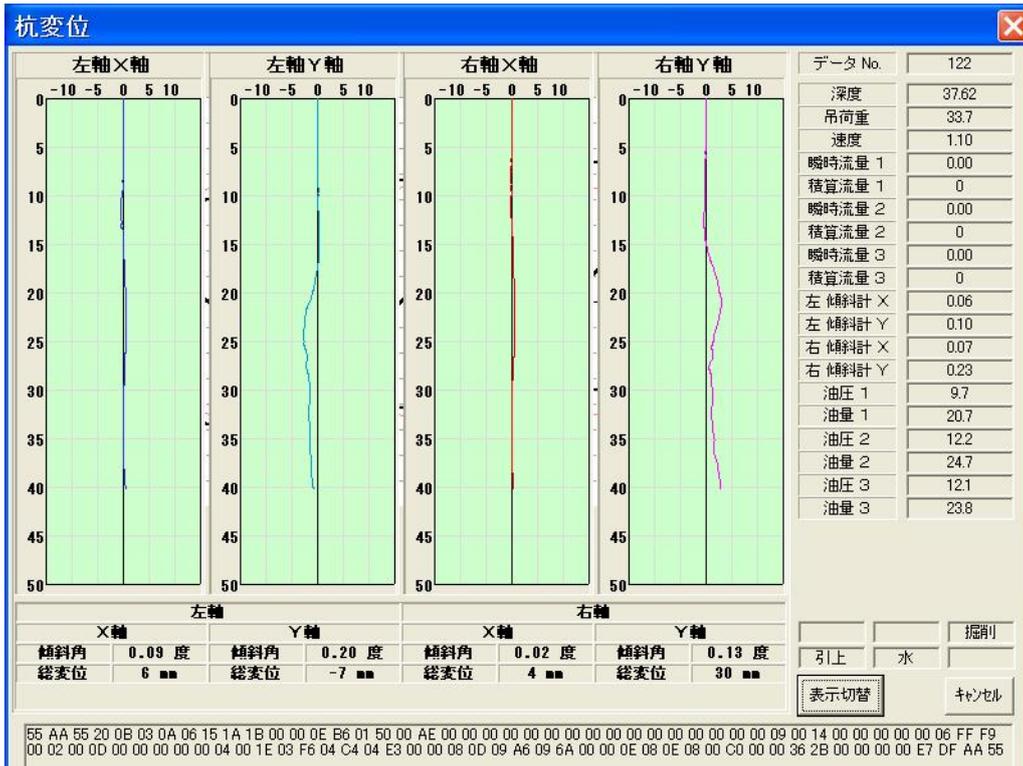


図-5 計測画面の1例

(図-4) . 地上の基準位置からオーガ先端におけるXY方向の変位量は、同時に測定しているオーガの深度データを利用して求める。つまり、左右オーガ、XY方向のそれぞれの傾斜角と掘削深度の変化分を乗じた結果を深度方向へ順次加算し、その値を変位量としている。

本システムは鉛直精度の計測だけでなく、モータ関連の稼働データと掘削深度、掘削速度、ベースマシンの吊り荷重および注入プラントの注入データを取り込み、運転席のオペレータに計測結果を表示するとともに、無線により計測室へデータを送り、そこでも同一の監視を可能にしている。

連続計測システムの計測画面を図-5に示す。画面には4つの図が表示され、左から掘削深度と左オーガのX軸、Y軸方向の変位量、右オーガのX軸、Y軸方向の変位量を示している。他に、オーガ先端の位置と設計位置を示した画面、油圧モータの圧力など、掘削に関するデータが表示される画面がある。

画面はグラフィックでリアルタイムに表示でき、タッチパネルで画面の表示を簡単に切り換えることができる。オペレータは画面を見ることで、現在のオーガの位置のずれや地盤の硬さの変化などを確認できる。

(2) 修正機構

修正機構として、特別な装置があるわけではない。各軸に、それぞれモータが装着され、それぞれが単独に回転方向、回転数を変えられることを利用して修正する。少なくとも一つのオーガヘッドの回転に対し、固定軸は逆方向に回転しようとしているので、オーガヘッドを逆回転させることで、修正することが可能である。しかし、3軸であるため、必ずしも一定の法則に従い修正できるものではないが、試みることで変化する。

ねじれの原因として①装置固有の癖、②オーガヘッドの回転、③土質（礫の介在）、④支障物、⑤先行する壁と地山の強度差などがあげられる。修正に対しても、これらの要因を考慮する必要がある。

逆回転することで効果があるのは硬い層に押し付けた状態である。相手が軟らかい層の場合、硬くても上っ面を回転させていただけでは反力は期待できない。

3本のオーガヘッドが掘削している地盤は常に同一では無い。先行して造成した壁のモルタルは通常、地山より軟らかい。このため、連続方式の場合は中央のオーガ、片押し方式の場合は地山側のオーガの回転方向に着目すると、ねじれを制御できる場合がある。

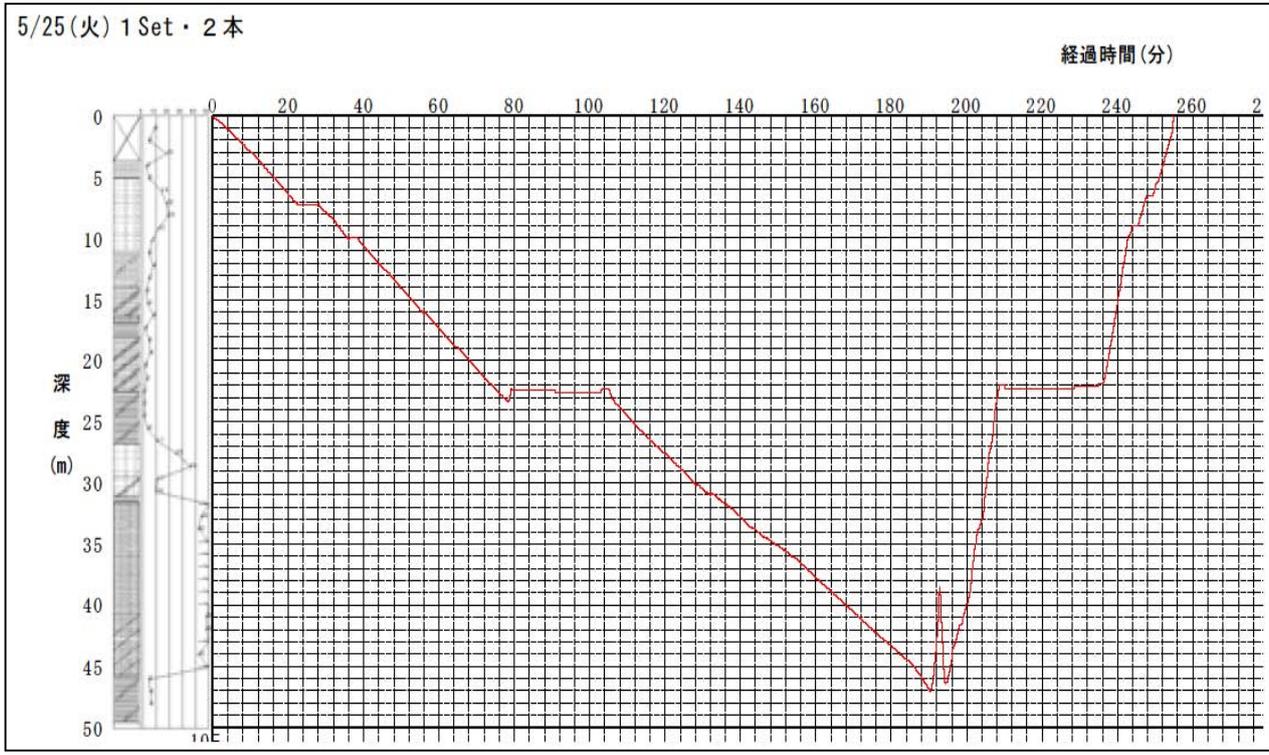


図-6 掘削深度と掘削時間の関係 (深度 46m)

5. 技術審査証明

(1) 評価項目

技術審査証明を受けた内容は以下の4項目である。

- ① 礫径が 30cm 以下の地盤において、先行掘削無しで、掘削径 90cm、深度 45m の柱列壁が造成できること。
- ② 礫径が 30cm 以下の地盤において、造成した柱列壁の鉛直精度が、45m の深度で 1/300 を確保できること。
- ③ 従来工法に比べ低騒音で施工ができ、かつ、施工時間の短縮が図れること。
- ④ ベースマシンと掘削位置の施工基面が異なっても、柱列壁が造成できること。

(2) 施工能力

中之島新線建設工事のうち開削工事影響調査（以下、調査工事と呼ぶ）において、削孔径 900mm、軸ピッチ 600mm の施工機械で、先行掘削を行わず、天満礫層を含む 40m の掘削が可能であることを示した。施工した数量は 3 軸が 15 セットである。

中之島新線建設工事というのは、京阪電気鉄道京阪本線天満橋駅から中之島の北岸を通り、なにも筋の玉江橋に至る 2.9km 間に鉄道の新線を建設する工事である。



写真-1 掘削中に上がってきた礫

その後、和歌山市の下水道工事で掘削深度 46m の施工を実証している（図-6）。32m 以深の土質は 30cm を超える礫の存在する砂礫層である（写真-1）。N 値 10 程度の浅い区間の掘削時間は 3.2～3.4 分/m、N 値 50 以上の礫層で 4.1 分/m であった。

UD-HOMET は、オーガが 1 回転する中で、正転、逆転を 8：2 といった割合で行うことができ、この揺動回転と呼ぶ動きが可能のため、礫がオーガ間にかみ込むのを防止するだけでなく、圧縮強度の弱い礫に対しては、クラッシャの効果が生じ、破碎することができる。

(3) 鉛直精度

駆動モータが地下にあること、修正機構を有すること、掘削中にリアルタイムに計測が行えることから、従来のSMW工法と比較して掘削の鉛直精度は向上する。

調査工事において、土留め壁の最終掘削深度（H=41m）におけるUD-HOMETと従来のSMWで鉛直精度を比較したものを図に示す。掘削時の左右軸ごとに、XY方向の最終変位量をX-Yグラフ上にプロットしたもので、図-7の上図はUD-HOMETであり、下図は従来工法（SMW）である。UD-HOMETは、ほぼ150mm以内の変位量（円）に収まっている。この値は鉛直精度で表すと1/270である。

同様に、和歌山市の下水道工事において、最終掘削深度（H=46m）における鉛直精度をプロットしたものを図-8に示す。円の半径は150mmであり、鉛直精度に換算すると1/300である。

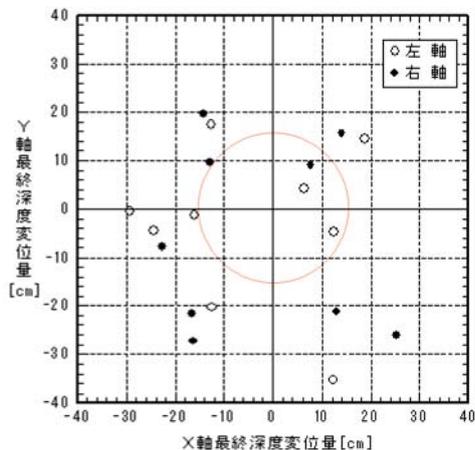
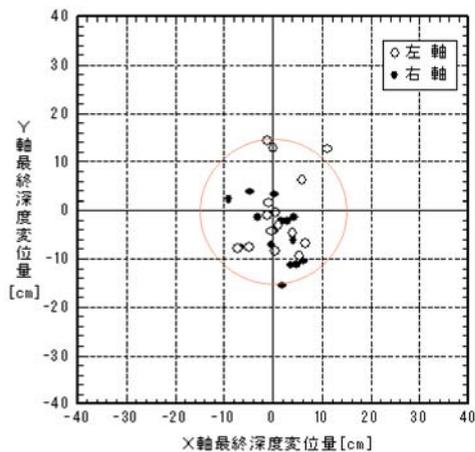


図-7 調査工事における鉛直精度
上側：UD-HOMET
下側：従来工法(SMW)

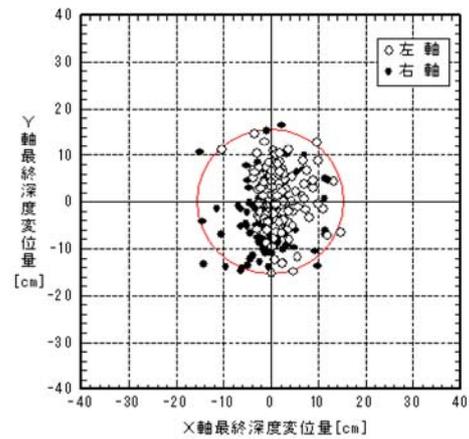


図-8 45m掘削時の鉛直精度

(4) 騒音と施工時間

a) 騒音

UD-HOMETの駆動モータが地下に入ると、駆動部からの音は全くしない。聞こえるのは油圧発生装置やセメントミルクプラントの機械音であるが、静穏を要求される場所から、これらの音源を遠ざけたり、囲うことは可能である。

調査工事ではベースマシーンから30m離れた地点での騒音を夜間に測定した。その結果を以下に示す。

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

UD-HOMETと暗騒音が同等の70dBであるということは、暗騒音の方が騒音レベルが大きい。従来SMWは暗騒音の影響を補正すると73dBとなる。

さらに、別の現場でも従来SMWとUD-HOMETの騒音を測定したが、UD-HOMETの方が小さい値を示している。



写真-2 騒音測定状況（従来SMW）

表-1 施工時間の比較

	UD-HOMET	従来SMW
	E-S-12	E-W-7
先行掘削	0	(141分)
掘削	265分	246分
計測	0	26分
芯材建込	105分	130分
合計	370分	402分 (543分)

b) 施工時間

調査工事では1サイクル(48.6m²)当たり7.63時間を要した。これに対し、従来のSMWでは10.6時間であった。この要因として、先行掘削が無いこと、掘削中に鉛直精度の計測を行えることがあげられるが、芯材(H-700mm×300mm×40m)の建て込み時間が短かったことが特筆すべき点である。

代表例で比較したものを表-1に示す。掘削時には、機械の掘付から掘削、底部攪拌、オーガの引き上げまで一連の作業を含んでいる。建て込み時間を比較してみると、UD-HOMETで105分、SMW工法では130分と25分も差がある。これは掘削の鉛直精度の差が、作業時間として表れたと解釈できる。

前述の図-6は掘削径90cm、46mの深度を掘削した時の掘削時間と深さの関係である。46mであるにもかかわらず、掘削時間が256分であり、1m当たり4分程度で掘削しているのがわかる。

(5) フライング施工

オーガヘッドおよび中空モータ、オーガを一体にした掘削装置をクレーンで吊ることができ、掘削装置の吊り下げ部を固定軸にしたことで地表面で振れを固定できるため、クレーンで吊ったまま作業することが可能になった。この施工方法をフライング施工と呼ぶ。写真-3は100tクローラで41m掘削した実験の状況である。

従来のSMWでは、施工箇所の近傍にベースマシンを設置する必要があり、重い駆動部が最上部にあるため、傾斜地での施工には適さない。

しかし、本工法ではクレーンで吊ることができるので、施工箇所にベースマシンが近寄れない場所での施工も可能となる。この利点により、フライング施工は、名古屋の道路工事で採用された。

また、ベースマシンと掘削位置の施工基面が異

なる場合や施工箇所が傾斜地の場合でも柱列壁が造成できる。高台の上または下など、段差がある条件での施工(図-9)はもちろん、川や障害物を越えての施工、など応用範囲は広い。論文執筆の時点では実施されていないが、傾斜地でのフライング施工を実施する予定である。



写真-3 フライング施工

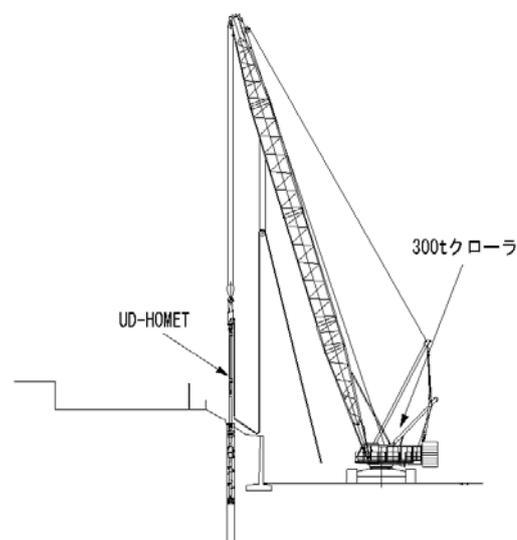


図-9 施工基面が異なる状況での施工イメージ



写真-4 中之島新線建設工事での施工状況

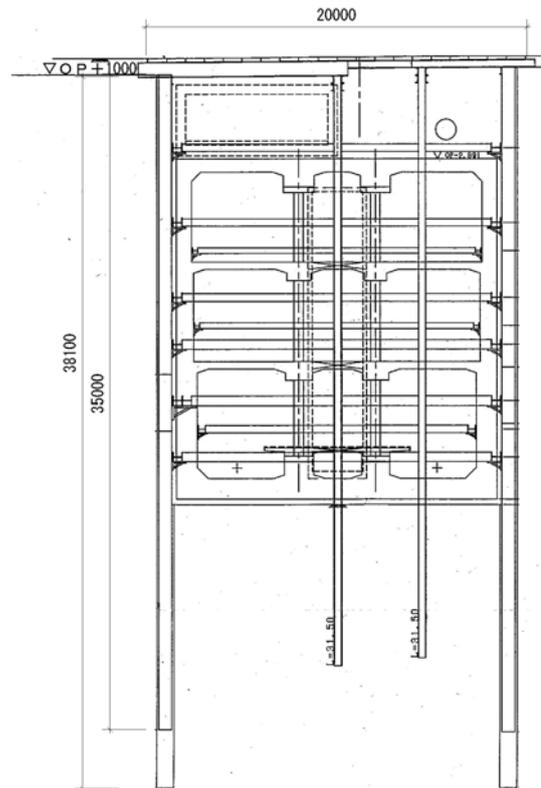


図-10 中之島新線建設工事 標準断面図

6. 現場への適応

UD-HOME Tは、中之島新線建設工事のうち開削工事影響調査工事を経て、現在、中之島新線建設工事のうちの4つの工区で採用されている。掘削径900mm、最大掘削長は41.0mである。図-10は、中之島新線建設工事のうち土木工事（第3工区）の駅部土留め壁の断面図であり、掘削長さが38.1m、芯材長さが35.0mであることを示している。土質は、砂質土および粘性土であるが、地表から30m以深はN値50以上の砂質土であり、そこには3～5m程度の天満礫層が介在する。

すでに施工が完了している範囲と、今後、施工を行う範囲を合わせて、約50000m²の土留め壁を造成する予定である。

7. おわりに

最後に、東京工業大学の太田秀樹先生をはじめ委員の方、事務局として施工技術総合研究所の皆様には貴重な時間を本技術の普及のため議論していただいたことに深く感謝の意を表します。

なお、建設機械化技術・技術審査証明の審査を受けたのは大成建設株式会社、成幸工業株式会社、成和機工株式会社の3社であることを付け加えます。

参考文献

- 1) 地中連続壁基礎協会技術委員会：地中連続壁の適用性と今後の可能性，基礎工，pp. 25-29，2004年11月
- 2) SMW連続壁標準積算資料【設計・施工・積算編】：SMW協会，pp. 81-82，2003年9月版