

# 水平移動掘削装置による地下連続壁工法の開発

New Diaphragm Wall Machine—Horizontally Moving Rig

平野 舜一\*  
Shunishi Hirano

大原 直\*\*  
Tadashi Ohara

土橋 吉輝\*\*  
Yoshiteru Dobashi

平田 篤夫\*\*  
Atsuo Hirata

## 要 約

地下連続壁の深度100mを超える大規模化、本体構造物への利用など、変遷するニーズに対応するため、高精度・長深度施工と経済性を目的とし、掘削刃を水平移動して掘削する新しい施工システムを開発した。本システムの実施結果から、①従来方法に比べて、同一条件下で掘削能率が約1.6倍に向上する、②ガイド杭に沿って掘削するため高精度掘削が容易で、目遣の恐れがないことがわかった。また、長さ10mの長エレメントを一括施工でき、円弧状エレメントの掘削も可能という特徴をもっている。

### 目 次

- § 1. はじめに
- § 2. NEWS (Nishimatsu Earth Wall System) 工法
- § 3. 実証実験および実施工
- § 4. これからの課題
- § 5. おわりに

### § 1. はじめに

地下連続壁は、都市土木・建築を主体に比較的大型地下構造物の仮壁又は本体壁の一部として採用され、昨今では大深度地下連続壁の高精度な施工が脚光を浴びている。

当社では、大深度地下連続壁施工を目的とし、汎用機を利用した基礎実験、試作機による実証実験を行い、より合理的な施工システムの確立へと研究を進めてきた。

この新しい施工システム(以下にNEWS工法という)は、定距離はなして予め施工した2本のガイド杭間に掘削機を嵌めこみ、垂直2軸の掘削刃を掘削機のフレーム内で横移動させて掘削し、掘削土砂を泥水逆循環方式で排出する方法である。

想定する開発効果を実証するため、形状の異なる3機種を試作し、実験および実施工を重ね、NEWS工法の商

用化を達成した。さらに、本工法の適用分野を拡大すべく研究開発を継続中である。

### § 2. NEWS (Nishimatsu Earth Wall System) 工法

新しく開発した試作1号機は、Photo 1 に示すとおり上下2連のフレームと、このフレームを案内に横移動できる掘削装置とからなり、先行施工したガイド杭にそい掘削機を単位長降下させ、ビットを回転させながら掘削装置を横移動して掘削する。

切削した土砂は、掘削装置に内蔵したサンドポンプ又は地上に設置したサクシオンポンプで移送し、切削土と

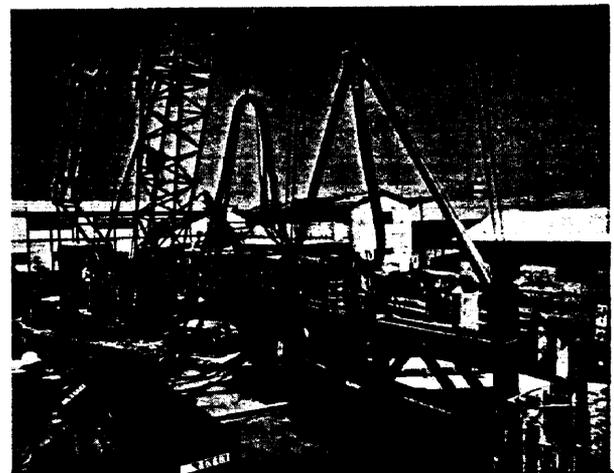


Photo1 試作1号機  
1st trial excavator

\*横浜(支)大和技研(出)副所長

\*\*技術研究部土木技術課

泥水を分離して泥水のみ溝内に循環する。

本施工システムで想定した開発効果は次のとおりである。

- (1) フレームを任意の平面形状、例えば円弧状に製作することで円形立坑の構築が可能である。
- (2) フレームを長くすることで10mに達する長エレメントの一括施工が可能である。
- (3) 先行ガイド杭を予め施工するため容易に高い掘削精度が得られ、エレメント間継手に目違いが生じない。

上述する開発効果の実証と施工性、施工能率、土質および掘削深度への対応や溝壁の仕上がり程度などの確証を得るため地質や掘削形状の異なる3現場で実験を行った。

### § 3. 実証実験および実施工

#### 3-1 基礎実験

大深度地下連続壁の施工時に重要とされる掘削精度管理手法に、独自に開発した相対偏位検知機構を汎用機に装架し、その計測値をオペレータにフィードバックしながら掘削機の姿勢制御を行った。溝壁掘削後には、形状の異なる2種類の仕切板付鉄筋カゴを挿入しコンクリートの打設を行ったもので、その詳細は西松建設技報VOL.4に記述のとおりである。

#### 3-2 試作1号機

Photo 1 に示す試作1号機は、切削ビット径60cm、掘削機全長6m、全高6.4mで、掘削装置移動用の上下2連からなるフレームは、半径30mの円弧状に製作した。

掘削機の動力源には油圧機構を使用し、地上に設置した油圧ユニットで油量をコントロールしながらビットの回転および掘削装置の横移動速度を調節するもので、その仕様はTable 1 に示すとおりである。

Table1 動力仕様(試作1号機)  
Specification of excavator  
(1st trial excavator)

切 削 装 置					
カッター関係			パワーユニット関係		
名	称	仕 様	名	称	仕 様
油圧モーター型式	M1900×2台		ポンプ型式	2V-SH 2×2台	
回転数	0~120r.p.m.		吐出量	0~220ℓ/min	
常用トルク	400kgf・m(at 140kgf/cm <sup>2</sup> )		常用圧力	140kgf/cm <sup>2</sup>	
常用圧力	140kgf/cm <sup>2</sup>		電動機	55kW×6P×200V×2台	
カッター	φ600mm×2個				
掘削力	1.3t(at 140kgf/cm <sup>2</sup> )				
走 行 装 置					
走行関係			パワーユニット関係		
名	称	仕 様	名	称	仕 様
油圧モーター型式	M1300×1台		ポンプ型式	BZ716S-100R-R2600	
回転数	0~29r.p.m.		吐出量	0~40ℓ/min	
常用トルク	260kgf・m(at 140kgf/cm <sup>2</sup> )		常用圧力	140kgf/cm <sup>2</sup>	
常用圧力	140kgf/cm <sup>2</sup>		電動機	11kW×4P×200V×1台	
走行用スプロケット	RS160-18T				
推進力	1.7tf(at 140kgf/cm <sup>2</sup> )				

本システムによる実証実験は、千葉県市原市の旧海浜埋立地であるシルト質細砂とシルトの互層をなす軟弱地盤で行った。実験概要はFig.1 に示すとおりである。

#### (1) ガイド杭の構築

・掘削……内径φ1.78mのケーシングパイプを地盤下6m迄、内部をグラブハンマで掘削しながらパワージャッキ HC-280tで圧入した。比重1.02のベントナイト溶液をケーシング内に満たし、ロータリーテーブルを据付け、リバーサーキュレーションドリルで径φ1.5mの削孔を行った。

(2) ガイド杭の建て込み・固結……平塚工場で作成・仮組みを行ったガイド杭を重心吊り方式で削孔内に建て込み、上部仮受けの状態底部を早強モルタルで根固めし、上部をFig.1 に示す配合のベントナイトモルタルで固結した。

#### (3) 連続壁の構築

・No.1 エレメントでは、本システムによる掘削性状の把握を行った。

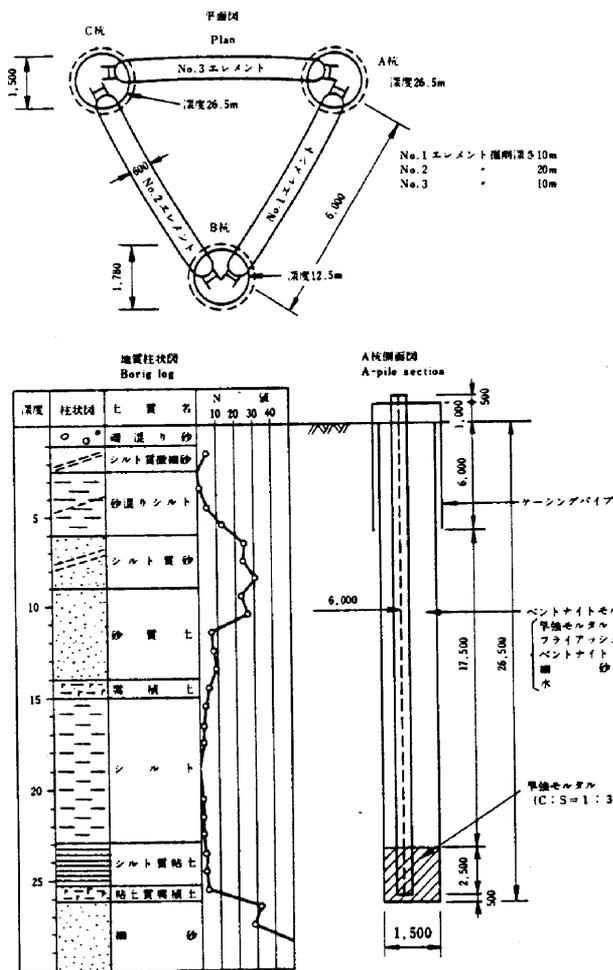


Fig.1 試作1号機による実験概要図  
Outline of test using 1st trial excavator

・No.2 エLEMENTでは、掘削機の単位降下深度10cmと15cm、掘削装置の横移動速度 3m/minと 6m/minとの組み合わせ実験を行った。

・No.3 エLEMENTでは、形状の異なるビットを2個追加製作し掘削性状の把握を行った。

掘削機重量が 5.5t と軽量なため、掘削機の降下時に苦難を伴ったものの、掘削能率は汎用機と較べ良好な値 (6m<sup>3</sup>/h) が得られた。

掘削機を単位長降下後掘削装置を1往復させる作業の繰り返し手法では、地上に設置したサクションポンプの吸い込みから本システムでは単位降下長10cm、走行速度 6m/minの組み合わせが最適と判明した。

3-3 試作2号機

1号機による実証実験で予想以上の成果を得たため、本システムを実施工に適用すべく開発を進めた。試作2号機の実施対象となった下総中山地区では、N 値50を越す硬質細砂層を掘削する必要があること、および掘削機が軽いことから、1号機の掘削機本体を流用するものの Fig.2 に示すように次の2点の改良を加えた。

- (1)掘削機両肩のフレームに油圧押し下げ機構 (Photo 2) を装架した。
- (2)切削用ビットをロードヘッダに似せた形状 (Photo 3) に製作した。

本実施工は、クラムシエルタイプの汎用機で施工する地中線立坑の一部を利用するもので、対象ELEMENTの一端をBH 杭で削孔し、ガイドとなる鋼材を精度良く建てこみ、早強モルタルで根固め後、上部をベントナイトモルタルで固結した。他端は、対象外ELEMENTを施工するMHL 機で掘削し、仕切板付鉄筋カゴを建て込み、

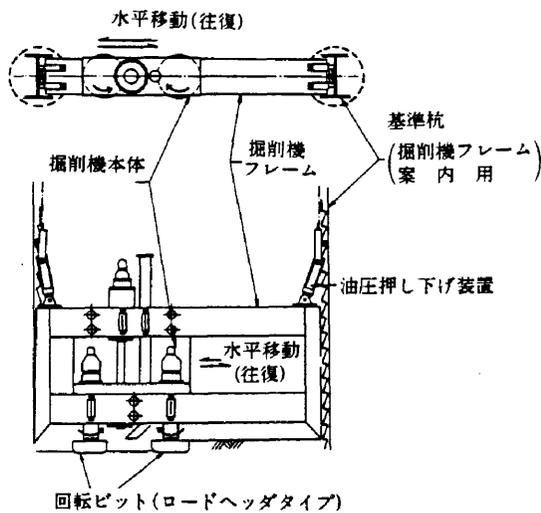


Fig.2 試作2号機  
2nd trial excavator



Photo2 油圧押し下げ装置  
Hydraulic downward propeler



Photo3 切削用ビット  
Cutting bits

根固め後、砂利を先行投入しながらコンクリートの打設を行った。

掘削は目視できない掘削機の挙動を把握するため、エンコーダから検出する積算深度と掘削機に設置した傾斜計をベースに掘削機の単位降下深度、任意時間における降下速度を計測室にデジタルおよび Fig.3 に示すようにアナログで表示させ、必要に応じ計測状況をオペレータに連絡を取りながら行った。

その計測状況を Photo 4 に示す。

ガイド杭の構築精度および掘削精度面を対象外ELEMENTの施工を行った汎用機との比較を Fig.4、掘削能率面での比較を Fig.5 に示す。Fig.4 では、強制的な方向制御を伴わない汎用機の重心吊り方式による掘削精度が、硬質地盤で良好な結果が期待できないことがわかる。Fig.5 では、汎用機が硬質細砂層で、掘削能率が1/5以下に低下しているが、NEWS 工法では、土質の硬軟による掘削能率の変動傾向が見あたらないのがわかる。

なお、掘削機の両肩に装架した油圧押し下げ装置も特に作動させることなく硬質地盤の掘削ができたことを付

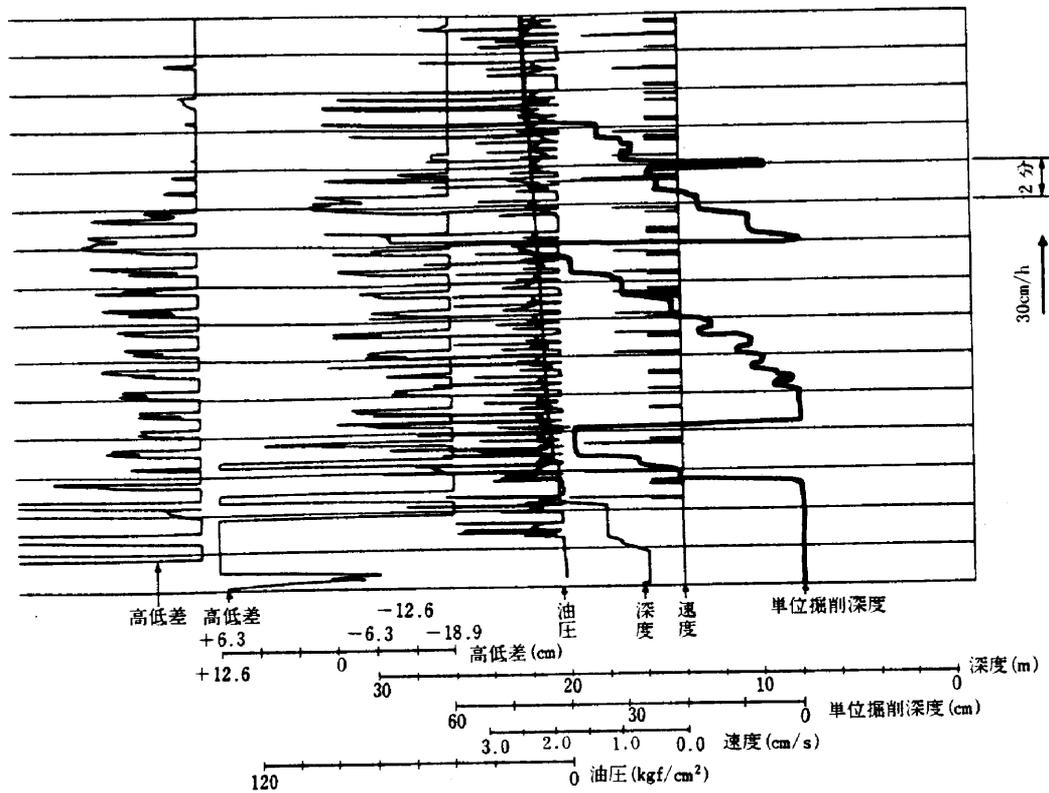


Fig.3 掘削性状  
Condition of excavation

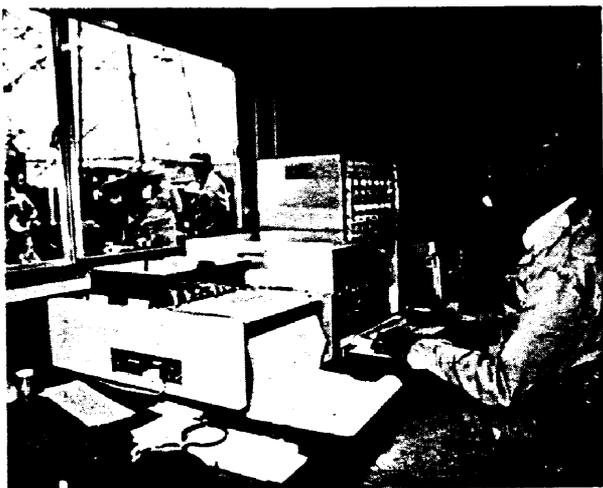


Photo4 計測状況  
Measurement

記する。

### 3-4 試作3号機

従来の汎用機の1回の掘削有効長は2.8m前後で、10m長のエレメントを掘削するには、先行掘削した溝に重ね合わせながら5回以上掘削機を規定深度迄降下させる必要があった。

この繰り返し作業には長時間を要し、軟質地盤では溝壁の崩落を誘発する恐れがある。

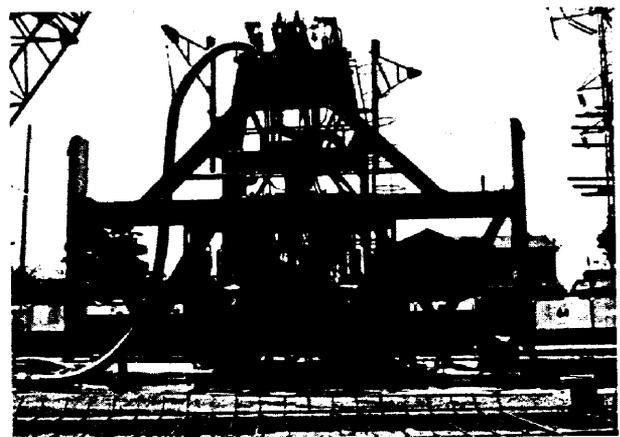


Photo5 試作3号機  
3rd trial excavator

この事象に着目し、10m長のエレメントを一気に掘削する手法を実現させたのが3号機である。おりよく深度44mの地下連続壁を地中線立孔の本体壁の一部として施工する現場があり、その1エレメントを利用し実施工を行うことの承諾を得、Photo5に示す3号機を製作した。Table 2に3号機の仕様を示す。

1・2号機との相違点は次のとおりである。

(1)掘削底がGL-44mと深いため油圧方式では、油圧ホースの取り扱いに難渋を来すため電動方式とした。

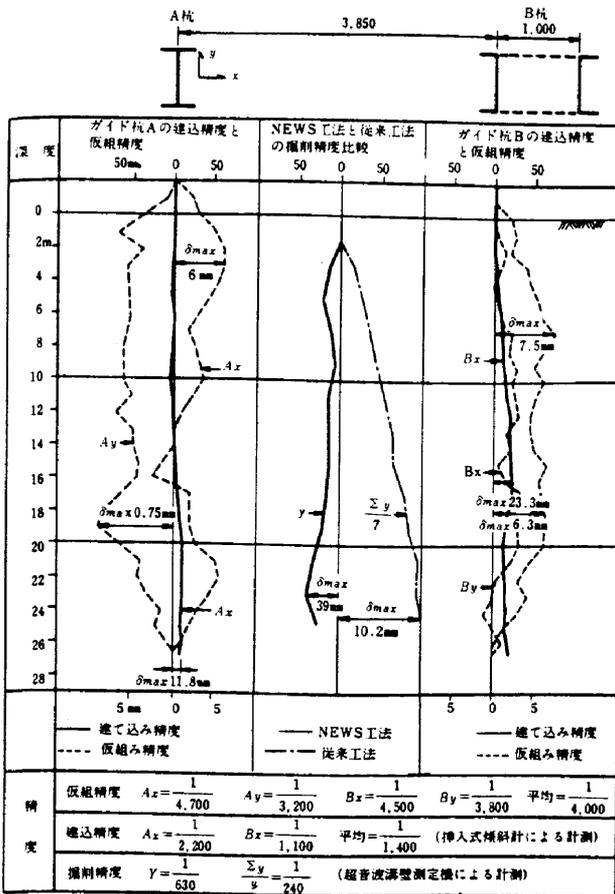


Fig.4 硬質地盤における施工精度の比較(試作2号機)  
Comparisons of excavation accuracy at stiff ground (2nd trial excavator)

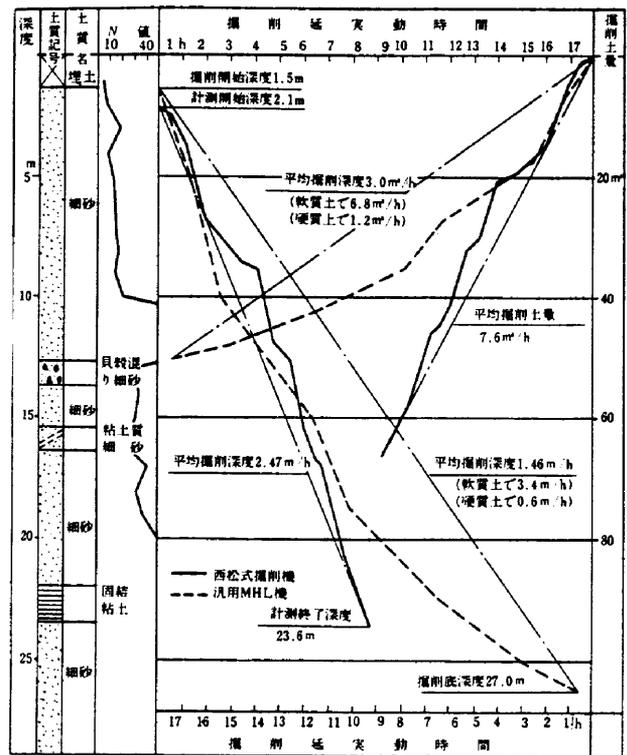


Fig.5 硬質地盤における掘削能率の比較(試作2号機)  
Comparisons of excavation efficiency at stiff ground (2nd trial excavator)

Table2 試作3号機の仕様  
Specifications of 3rd trial excavator

試作3号機			
仕	標	重	量
掘削スパン	10,000mm	掘削機本体	7.7t
掘削幅	900mm	吊 钩	1.1t
掘削機全長	9,840mm	フレーム	9.2t
掘削機全高	6,100mm	合計	18.0t
切 削 カ ッ タ			
カッタ外径	φ 900mm	カッタビット数	ロードヘッダ用24本/基
カッタ高さ	330mm	回転方向	左右各1基
走行用ギヤードモータ			
型 式	VJMS3-904B 1台	重 量	約700kg
電 動 機	2.2kW×4P×200V×50Hz	耐 圧 仕 様	5.5kgf/cm²
減 速 比	サイクロ減速機 354 : 1	走 行 速 度	約1.8m/min~5.5m/min
切削用ギヤードモータ			
型 式	VJMS20-90 2台	重 量	約800kg
電 動 機	15kW×4P×400V×50Hz	耐 圧 仕 様	5.5kgf/cm²
減 速 比	サイクロ減速機 35 : 1	トルク	約350kgf・m
水 中 ポ ン プ			
型 式	DP-30B-AR	電 動 機	22kW×6P×400V×50Hz
口 径	150mm	回 転 数	975r.p.m.
揚 程	15m	耐 圧 仕 様	10kgf/cm²
揚 水 量	3.2m³/min	重 量	約760kg
最大揚物径	60mm	台 数	2台

(2)サクシオンポンプによる混泥水の吸い込みは、掘削深度が増すにつれ効率が低下するためサンドポンプ内蔵方式とした。

本実施工のあらまはは、Fig.6に示すように対象とするエレメントの両端に仕切板付鉄筋カゴを先行施工し、10mに達する長エレメントの一括施工を行った。

### 1. ガイド杭の構築

#### (1)製作および仮組み

掘削機のガイドとなる仕切板付鉄筋カゴは、平塚工場にて運搬の関係から主筋の変化点で深さ方向に6分割して製作した。

全長は、本体壁構築長 44m に、上部仮受け余裕長 50cm と底部根固め所要長 2m を加えた 46.5m で、1/3000 以上の精度を目標に Photo 7 に示すように仮組みし、この精度を復元すべく継手部材の取り付けを行った。次に、建て込み後の精度を施工段階で検測するため挿入式傾斜計用パイプの取り付けを行った。

#### (2)構築

対象外エレメントの施工を行う BW80-120 で GL-

Table3 掘削性能試験  
Results of excavation efficiency

設 定 条 件		片道走行当りの表示性能		試 験			結 果		備 考	
掘削機 単位長降 下深度 (cm/回)	掘削装置の 無負荷状態 の走行速度 (m/min)	所要時間 (min, sec/回)	掘削量 (m <sup>3</sup> /回)	単位長降下後片道走行による 所要時間			走行モータ の負荷電流 (A)	単位時間当りの掘削能力		
				単位長降下及 びロスタイム	片道走行に 要した時間	計 (min, sec/回)		降下深度 (m/h)		掘削量 (m <sup>3</sup> /h)
10	1.958	2'28"	0.90	1'35"	2'33"	4'08"	4~5	1.45	13.1	
15		"	1.35	"	2'36"	4'11"	"	2.15	19.4	
20		"	1.80	"	2'32"	4'07"	"	2.91	26.2	
10	2.942	1'39"	0.90	"	1'39"	3'14"	6~7	1.86	16.7	
15		"	1.35	"	1'39"	3'14"	"	2.78	25.0	
20		"	1.80	"	1'39"	3'14"	"	3.71	33.4	
10	4.082	1'11"	0.90	"	1'15"	2'50"	8~9	2.12	19.1	
15		"	1.35	"	1'11"	2'46"	"	3.25	29.3	
20		"	1.80	"	1'11"	2'46"	"	4.34	39.1	
10	5.084	57"	0.90	"	57"	2'32"	10~11	2.37	21.3	
15		"	1.35	"	59"	2'34"	"	3.51	31.6	
20		"	1.80	"	58"	2'33"	"	4.71	42.4	

手法で掘削することにした。

Table 3 に示す実測例は、掘削機を単位長降下後掘削装置を片道走行させる操作の繰り返しを行ったものである。Table 3 から次の事柄が判明した。

- (1)掘削機の単位長降下に要する時間および掘削装置の走行切替え等に要する時間  $t=1.58\text{min}$  の値を得た。
- (2)掘削装置の負荷時における走行速度の減衰は認められなかった。

なお、性能試験中における切削土の吸い込み、および泥水循環に関するトラブルは無いものの単位長降下深度 0.15~0.2m、5m/min 以上の走行速度による片道走行・掘削機の単位長降下作業の繰り返しでは、走行モータが上限設定電流 11.1A に近い値を示した。このため、以降の掘削では、単位降下深度  $h=0.15\sim 0.20\text{m}$  の場合は、掘削装置を 1 往復させ、 $h=0.15$  未満の場合は、片道走行または 1 往復後、掘削機を単位長降下させる手法で掘削を継続し、異常がなかった。

実測値をもとに本システムの単位時間当りの掘削土量  $V$  を表示すれば、次式で表せる。

$$V = E \cdot \left\{ \frac{60}{\frac{l}{\rho \cdot v} + t} \right\} \cdot h \cdot s (\text{m}^3/\text{h})$$

$E$  = 作業効率

$l$  = 掘削機本体の 1 サイクル移動距離 (m)

(試作 3 号機の片道走行距離は 4.83m であり、1 往復する場合は 9.66m である。)

$\rho$  = 掘削装置の走行効率

(掘削時の走行速度 ÷ 無負荷状態の走行速度)

$v$  = 掘削機本体の無負荷状態における走行速度 (m/min)

$t$  = 掘削機の単位長降下に要する時間および掘削装

置の走行切替え等に要する時間 (min)

$h$  = 掘削機の単位長降下深度 (m)

$s$  = 掘削するエレメントの平面積 (m<sup>2</sup>)

上式で、 $h=0.15\text{m}$ 、 $\rho \cdot v=5\text{m/min}$  とした場合、片道走行時の実働当りの理論最大掘削土量は、 $83.9\text{m}^3/\text{h}$  となる。

実測値をもとに掘削能率を試算してみれば、 $h=0.15\text{m}$ 、 $\rho=0.95$ 、 $v=5\text{m/min}$ 、 $E=0.7$  で、掘削装置を 1 往復後単位長降下させることにすれば、実働時間当り掘削土量は  $22.4\text{m}^3/\text{h}$ 、稼働時間当り掘削土量は  $16.1\text{m}^3/\text{h}$  となる。

対象外エレメントを施工する汎用機による稼働時間当り掘削土量は  $9.7\text{m}^3/\text{h}$  であり、掘削能率は NEWS 工法の約 60% であった。

試作 1・2 号機による実験および実施時における掘削機の単位長降下時には、必要に応じ計測室から連絡はしたが、吊りワイヤロープにテーピングした表示をオペレータが検視しながら行っていた。3 回目の実施例では、積算深度、任意時刻からの累計深度および掘削機の降下速度を運転席にデジタルで表示させ、掘削機の挙動を目視しながら操作する手法を取り入れたことも作業性改良項目の 1 つといえる。加えて、泥水中で左右走行する掘削装置の位置等を Photo 8 に示すようにパネル表示すると共に簡易な操作手法を取り入れた。

規定深度迄掘削が完了すると、溝壁面の掘削状況、先行ガイド杭に付着するスライムの検知を超音波溝壁測定器、溝底スライムの検知を界面検知器で検測後、所定の鉄筋を吊り込みコンクリートの打設を行った。

立坑の開削につれ、汎用機で掘削した溝壁の仕上り状態と比較する機会を得たわけであるが、本システムによる溝壁の仕上り状態は Photo 9 に示すとおり、前者と

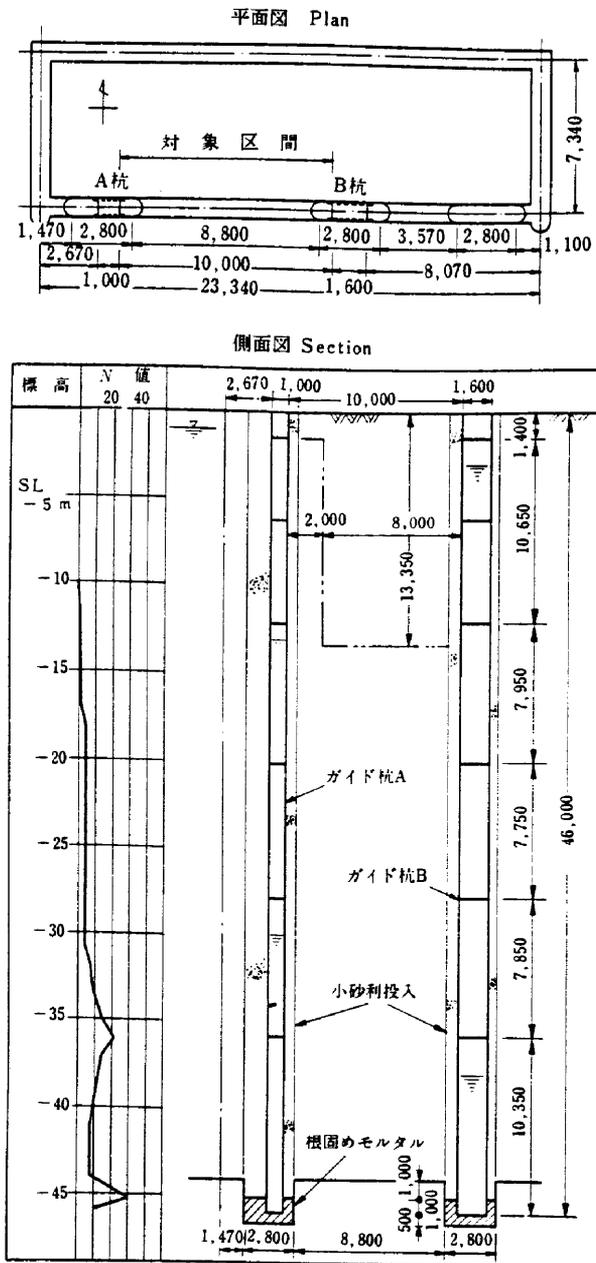


Fig.6 実施概要図(試作3号機)  
Outline of excution (using 3rd trial excavator)

46.5m迄掘削し、掘削機のガイドとなる仕切板付鉄筋カゴを重心吊り方式で建て込んだ。Photo 7は継手部の施工状況を示す。

上部固定架台に仮受けの状態で、底部1.5mを早強モルタル(C:S=1:3)で根固めし、A杭は内圧を仕切板で支えながらコンクリートの打設を行い、B杭では両端に砂利を先行投入しながら打設した。

2. 対象エレメントの構築

通常深度である1・2号機の実験および実施例では40トン級のクローラークレーンで試作機を吊りながら掘削していた。3号機では総重量が18tとなるため、対象外エ

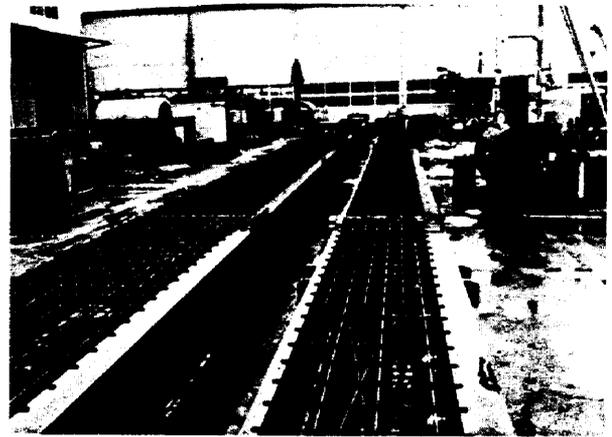


Photo6 ガイド杭の仮組み状況  
Temporary fabrication of guide pile



Photo7 ガイド杭構築状況  
Fabrication of guide pile

レメントの施工に供した汎用機の専用槽を改良して使用した。

ガイド杭を構築後、予じめガイドウォール天端から1.9m下り迄オレンジビルバケットで掘削し、3号機をガイド杭にそい降下させ、宙吊りの状態で泥水循環を行った。次に、掘削機を降下後横移動を主体に掘削するのであるが、掘削には次の手法がある。

- (1)ビット垂直部の高さ(20cm)の範囲で掘削機の単位降下長を変えることと、掘削装置の横走行速度(無負荷状態で1.8~5.5m/min)の選定による組み合わせ。
- (2)掘削機の降下には、掘削装置が所定の位置に移動したら走行を停止し掘削機を降下させる方法と、掘削装置の横移動と並行し掘削機を降下させる方法がある。

上記する組み合わせの中から、サンドポンプの能力および対象地盤の性状等を勘案した最適掘削手法の選択が必要である。

当該地区では実施対象を1エレメントに限定したため、浅深度掘削中に最適組み合わせの確証を行い、以降最適

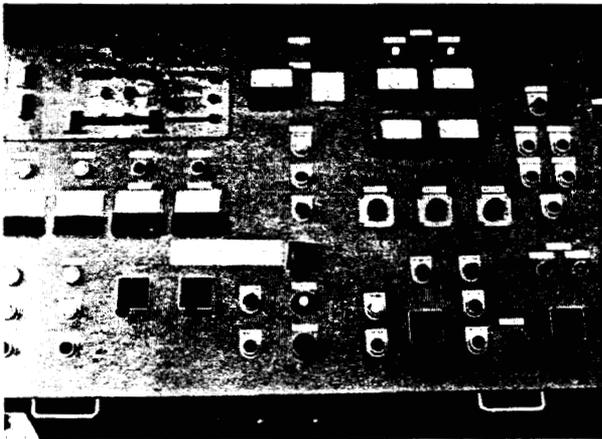


Photo8 制御盤  
Control panel

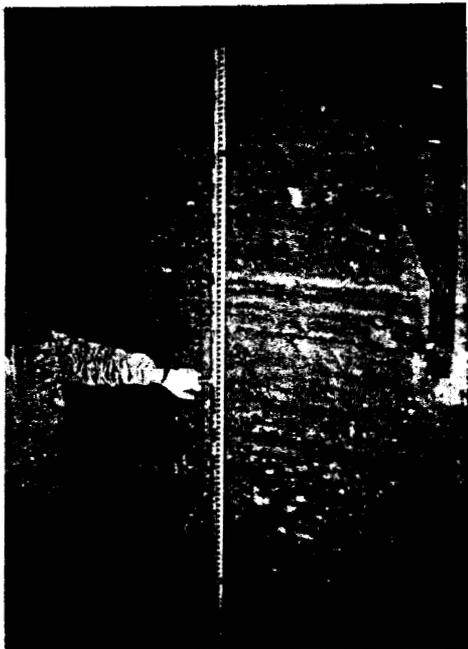


Photo9 溝壁の仕上り状況  
Completed diaphragm wall

較べ遜色のないことが確認できた。

当該実施例を利用し、打設したコンクリートの性状を把握するため次の計測を併せて行った。

- ① コンクリート初期圧計測
- ② コンクリート硬化後の圧縮強度、弾性係数等の試験

上記試験結果は、①については本号P.P15~20にその詳細を紹介する、②については後日報告する。

軟弱地盤での長エレメントの一括施工ということで油圧式溝壁崩落防止装置を事前に用意したが、この装置を使用することなく施工できたことも特筆すべき報告事項の1つである。加えて、掘削機本体とフレームとの滑動

機構、走行用モータの容量増など軽微な改良項目はあるものの、これまでに事例のない10mに達する長エレメントの一括施工に成功した。

#### § 4. これからの課題

NEWS工法はこれまでに1号機で大径円弧状地下連続壁の構築、2号機では硬質地盤での施工、3号機では長エレメントの一括施工と着実に実証を重ね、商用化に成功した。

さらに本システムの特徴を活かすべく研究開発を続けているが、その考えられる項目は次のとおりである。

##### (1)小径真円立坑の構築

圧気を伴う作業環境の悪いケーソン工法や、施工時に切梁支保工・完成時にかなりの所要部材を要する長深度矩形立坑に替わる小径真円立坑の構築手法

##### (2)幅幅地中壁の構築

所要部材厚に合わせ、任意深度において溝壁幅を変動させるもので、本システムを活かした合理的地下連続壁の構築法。

##### (3)通常深度における経済性の向上

NEWS工法で先行ガイド杭を使用する場合は、止水性が向上し、エレメント間に目違いを生じないなどの利点がある。さらに経済性を向上させるため、本工法で使用される鋼杭の引き抜き、または鋼杭を用いない地下連続壁の構築法。

#### § 5. おわりに

地下連続壁工法は、欧州で考案され我が国で完成されつつある工法といえる。当該工法の適用分野が拡大する中で作業環境も厳しさを増し、その技術開発は多岐に亘り要望されているのが現状である。当該技術を導入してから20余年経過し、これまでに数多くの施工システムが完成している中で、NEWS工法は微細な改良項目を残すものの短期間に完成された。これは関係各位の御協力の賜物と深く御礼申し上げる次第である。