

大深度地下連続壁における高精度掘削及び エレメント間継手に関する試験施工

平野 舜一* 西 保**
土橋 吉輝***

要 約

100 m程度の大深度地下連続壁を施工する時、一連の作業工程の中で最も重要である①高精度掘削方法と、②エレメント間継手の検討を行い、その結果を確認する為試験施工した。

高精度掘削については、従来の掘削機傾斜から孔曲りを推測する方法ではなく、地上の不動点と掘削機をワイヤロープで結び、ワイヤロープの傾斜と長さ（深度）から掘削機の水平偏位量すなわち孔曲り量そのものを把握し、これを基に掘削機の傾斜を制御して、孔曲りを修正する方法をとった。結果は、孔曲りが発生しても制御機能が働いて、最大孔曲り量3 cm（ワイヤロープの長さ・傾斜より算出）で十分高精度（最大孔曲り量／掘削深度 $\approx 1/1,500$ ）に掘削することができた。

エレメント間継手については、仕切板とシートを組み合わせた継手を鉄筋カゴと一体に組み立て、掘削溝に建て込む方法を用いた。結果は、①継手付鉄筋カゴは高精度の製作（ $1/4,000 \sim 10,000$ ）および建込（ $1/4,500$ ）ができた。②仕切板およびシートは、コンクリート打設による移動・変形・破損がなかった。③仕切板に付着したスライムは、ワイヤブラシとジェット水により除去することができた。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 掘削方法及び精度管理方法、エレメント間継手の検討
- § 3. 試験施工
- § 4. まとめ

§ 1. はじめに

地下連続壁工法が我国に導入されて約20年を経過したが¹、その間、施工機械・施工技术に我国独特の研究開発が加えられ、地下貯槽の周壁、ダム止水壁、ビル地下外壁などに広く利用されている。

また、最近LNG地下貯槽の建設において従来にない大深度の地下連続壁が用いられて注目されている。これは次の理由による。

一般に限られた敷地内で大容量のLNG地下貯槽を作

る時、屋根構造の問題や土地の有効利用の観点からみると貯槽半径はそのままにして深くする方が経済的であること。また、逆巻工法やオープンケーソン工法で地下貯槽を建設する場合、ドライワークで掘削するために周壁（地下連続壁）を不透水層まで施工する。このとき適当な浅い位置に不透水層がないことがあり、さらに深い位置の不透水層を利用することになり大深度の地下連続壁が必要となるためである。

地下連続壁の深さは、過去の実績によると10～13万kl LNG地下貯槽で、約100 mである。

当然、このような大深度地下連続壁の施工では止水性確保等のため高精度の掘削が要求されるが²、従来の施工技术だけではこれを達成するのが困難である。

今回の試験はこのような大深度地下連続壁の施工上の問題点を解決するために

- (a) 掘削精度管理方法
- (b) エレメント間継手方法

の2点に主眼を置いて施工法の検討を行い、その結果を試験施工したものである。

*技術研究部土木技術課係長

**技術研究部土木技術課

***技術研究部土木技術課

§ 2. 掘削方法及び精度管理方法, エレメント間継手の検討

2-1 掘削方法の検討

大深度の地下連続壁を高精度に掘削する方法は、大きく分けて①あらかじめH形鋼を精度よく施工しておき、これをガイドにして掘削する方法と、②掘削機自体に孔曲り修正装置をとりつけて掘削する方法の2つがある。

①の方法はガイド杭方式とも呼ばれ、主にバケット式掘削機を使用する場合に採用される。バケット式掘削機は一般に機械自体で孔曲りを修正するのが困難であるため、掘削に先行して、リバーササーキュレーションドリル等で掘削機の両端部にあたる部分を削孔し、この孔内にH形鋼や特殊鋼材を精度よく(例えば1/2,000~1/3,000)に建て込み、周囲を泥水固化あるいはベントナイトモルタル、砂利などで掘削時に移動しない程度に固定し、これをガイドとして掘削する方法である。

一方、②の方法は多軸回転ビット(BW掘削機など)による浚渫式掘削機を使用する場合に採用される。掘削機自体に姿勢修正装置(アジャスタブルガイド=前後面左右に4個程度、写真-1参照)を装備しておき、孔曲り量を何らかの方法で検知して、これを基に姿勢制御装置で孔曲りを修正しながら掘削する方法で①のようにガイド杭を必要としない。

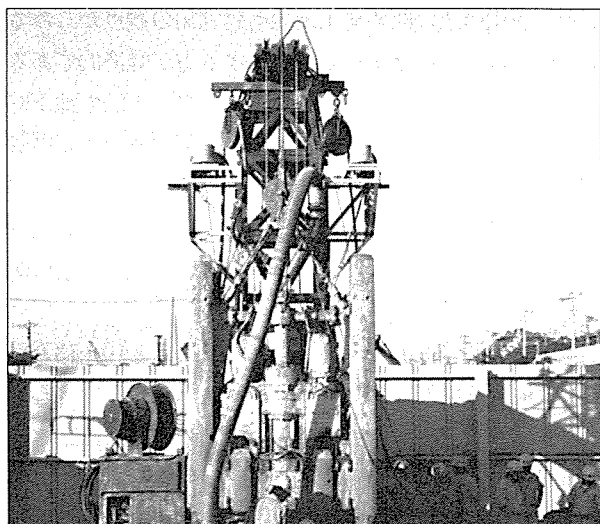


写真-1 掘削機(BW5580)

両者の特徴は表-1のとおりであるが今回の試験施工では、実工事と並行して実施したため、施工機械は実工事と同じものを使用しなければならないという制約があって多軸回転ビット式掘削機(BW5580、利根ボーリング社製、写真-1参照)を使用した。従って高精度掘削

方法も②の方法とし、この場合の掘削精度計測方法及び管理方法、エレメント間継手方法の検討を行った。

表-1 ガイド杭方式と本体制御方式の比較

	①ガイド杭による方法	②掘削機本体で孔曲りを修正する方法
掘削精度	●ガイド杭(建込精度1/2000程度)により高精度の掘削が可能で、しかも目違いの恐れがない。	●掘削精度は1/1000程度であるが隣接エレメントは独立して掘削するためエレメント間に目違いの可能性あり。
掘削能率	●掘削速度は②より早い、ガイド杭の施工が必要(但し併行作業可能)。	●掘削精度確保のためビット荷重調整などにより①より若干遅い。
経済性	●ガイド杭が必要のため②より不利	●①より有利

2-2 掘削精度管理

従来のBW掘削機の掘削精度管理は、掘削機に取り付けた傾斜計(x,y2方向)によって機体の垂直面に対する傾斜を検知し、これをもとにオペレータが遠隔操作で姿勢修正用のアジャスタブルガイドを作動させ、機体を垂直に修正する方法であった。

しかし、この方法は、オペレータが常時慎重に機体の傾斜をコントロールしても、余掘された溝壁内では、かならずしも掘削溝の傾斜と機体の傾斜が一致しないこと、また極端な場合、機体が傾斜“零”の状態^{ゼロ}で横這りして孔曲りが発生してもこれを検知することができないなどの欠点があり、高精度の掘削が望めず、過去の実績では、この方法による掘削精度(最大誤差/深さ)は約1/300であった。

大深度の場合、さらに高い掘削精度(1/1,000程度)が要求されるため、この方法に代る新しい掘削精度管理方法が必要となる。

ここで、従来の方法が掘削機の傾斜角を測定しているのに対し、掘削機の水平偏位量(孔曲り量)を検知することができれば、従来方法の欠点をなくすることができる考えた。

すなわち、従来方法は機体の傾斜を検知しこれをもとにオペレータが孔曲り量を推測しているのに対し、機体の水平偏位量がわかれば正確に孔曲り量を把握でき、これにより孔曲りが小さい間に掘削機が正規の位置に戻るよう機体の姿勢をコントロールすれば、さらに高精度の掘削が可能となる。

掘削機の水平偏位量を計測する方法は次の2つの方法が考えられる。

1つは①地上の不動点と掘削機を結ぶワイヤロープを

掘削機（モータドリル）の2方向（壁長方向と壁厚方向）の傾斜角を検知する。

② ワイヤ傾斜計

ワイヤロープの2方向の傾斜角を検知し、掘削機のねじれ具合を知るため、左右2個設置してある。

③ 櫓傾斜計

櫓の傾斜角を検知する。これはビットの荷重状態により櫓が傾斜するためワイヤロープの傾斜角を補正する目的を有する。

④ エンコーダ（深度計）

プーリーの回転数によりワイヤロープ長を検知する。

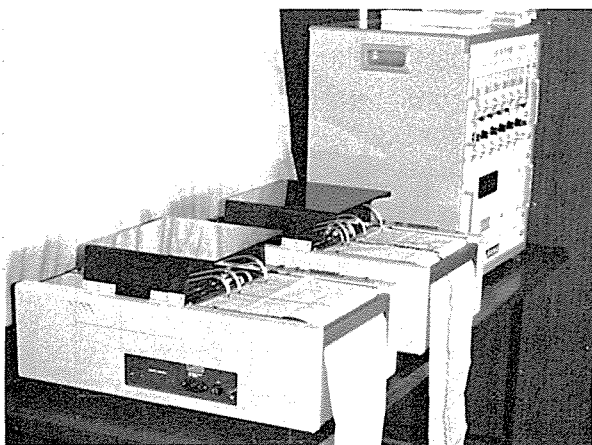
⑤ リミットスイッチ

アジャスタブルガイドの作動状態（ON, OFF）を検知する。

⑥ 圧力センサ

ビット荷重を検知する。

今回の試験ではBW掘削機の台車の都合上、写真－3に示す掘削精度管理用計器（増幅器、演算機、ペンレコーダ）は外部の管理室に設置して、出力結果を試験者が判断して載頭式送受器によりオペレータにフィードバックしたが、直接オペレータ席に設置することも可能である。

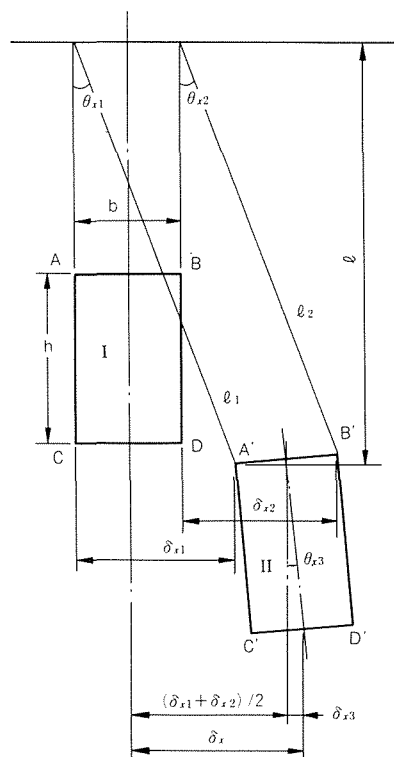


写真－3 孔曲り測定装置の増幅部、演算部、出力部

(2) 演算法

掘削中の掘削機の基準点からの水平偏位量を算出する場合、厳密解は3次元で得られるが、実施工上誤差が小さく精度管理に支障がないことと演算を簡単にするために本試験では、 x 方向（壁長方向）と y 方向（壁厚方向）に分割して水平偏位量を求める。

x 方向について図－3に示すように掘削機がIの



図－3 掘削機の移動(x 方向)

状態からIIの状態に移動した場合を考える。ここでワイヤ傾斜角 θ_{x1} 、 θ_{x2} および掘削機傾斜角 θ_{x3} は実施工上 $0.0 \sim \pm 0.01$ ラジアン範囲内にあり十分小さい値である。

A' 点の水平偏位量 δ_{x1} はワイヤロープ長 l_1 より

$$\delta_{x1} = l_1 \sin \theta_{x1} \doteq l_1 \theta_{x1}$$

また、ワイヤロープ長 l_2 は l_1 を用いて表わすと

$$l_2 = \frac{l_1 \cos \theta_{x1} - b \sin \theta_{x3}}{\cos \theta_{x2}} \doteq l_1 - b \theta_{x3}$$

となる。これよりB' 点の水平偏位量 δ_{x2} は

$$\begin{aligned} \delta_{x2} &= l_2 \sin \theta_{x2} \\ &= (l_1 - b \theta_{x3}) \cdot \theta_{x2} \doteq l_1 \theta_{x2} \end{aligned}$$

である。掘削機頂部の水平偏位量はこれで十分であるが、實際上、掘削機先端部C', D' 点の水平偏位量も必要である。C', D' 点の水平偏位量はそれぞれ δ_{x1} 、 δ_{x2} に

$$\delta_{x3} = h \sin \theta_{x3} \doteq h \theta_{x3}$$

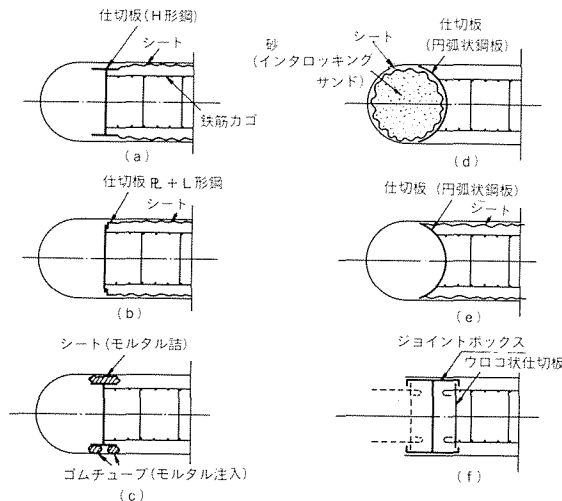
を加えればよい。 y 方向についても同様に行えば得られるためここでは省略する。

2-3 エレメント間継手

仮設構造物として止水のみを目的とするエレメント間継手では、施工が簡単で確実なインターロッキングパイプ方式が用いられるのが通常であった。しかし100 m程度の大深度地下連続壁の場合、インターロッキングパイ

プの周面フリクションが増大して引拔が困難となる。

これに代る方法としては、仕切板とシート、ゴムチューブ、インタロッキングサンドなどを組み合せたもの、特殊ジョイントボックスなどが考えられる（図－4参照、但し先行ガイド杭方式に関するものは除外）。



図－4 考案した大深度用エレメント間継手

一方、大深度地下連続壁を仮壁として用いるときのエレメント間継手の具備すべき条件は

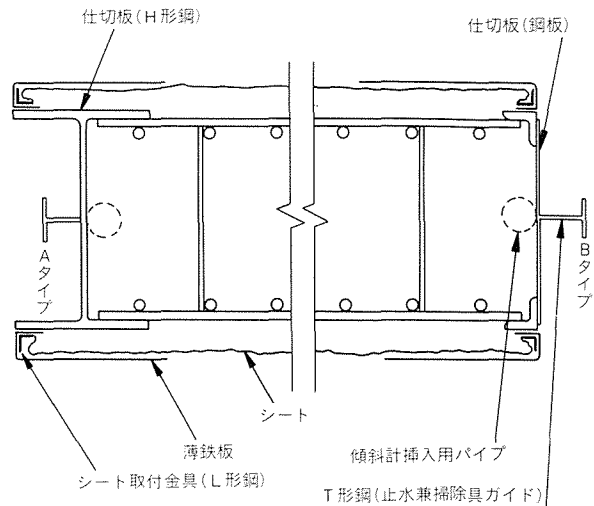
- ① 製作および施工が容易で、コストが低廉であること
- ② 後続するエレメントの掘削が容易であること
- ③ コンクリートが隣接エレメントに流出しないこと
- ④ 打設中のコンクリートの側圧により、変形・移動がないこと
- ⑤ 止水性が高く、可能な限り構造的に連続性を有すること
- ⑥ 継手の掃除（仕切板に付着したスライムの除去）が簡単であること
- ⑦ 大深度が高精度に施工できること

などである

今回の試験施工では、図－4の中から①～⑦の条件を考慮に入れて、シートと仕切板から成るAタイプとBタイプ（図－5参照）の2つのタイプを採用した。

(1) Aタイプエレメント間継手

- i) 仕切板はH－500×300をエレメント両側に2本使用。H形鋼のウェブにT形鋼を取り付けた。T形鋼は止水性の向上と仕切板に付着したスライムを掃除するときの仕切板掃除機のガイドとして利用



図－5 仕切板＋シート式エレメント間継手(A, Bタイプ)

した。

- ii) 仕切板と掘削溝壁面の隙間から隣接エレメントへのコンクリート流出を防止するためシートを取付けて全体を袋状にし、且つシートの破断防止のために垂鉛びき鉄板（幅45cm、厚さ0.3mm）を取り付けた。
- iii) 建込精度及びコンクリート打設による移動状態を測るため、挿入式傾斜計用のアルミ製パイプ（φ70mm、ガイド溝付）を取り付けた。
- iv) 仕切板付鉄筋カゴは長さ方向に5分割（10m×5分割＝50m）して製作したが高精度の真直度（目標精度1/3,000）を確保するため、地上で仮組みを行い建て込み時に仮組み時の真直度を復元するため、写真－4の仮繋部材を取り付けた。

（写真参照）



写真－4 仮繋部材

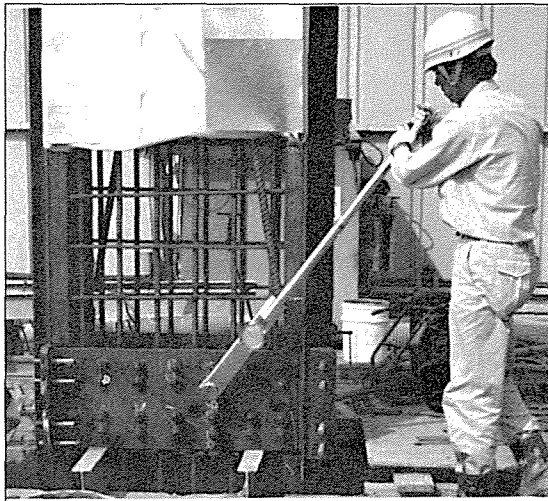


写真-5 高張力ボルトによる鉄筋カゴ接続

(2) Bタイプエレメント間継手

基本的にはAタイプと同じであるが相違点は次のとおりである。

- i) 仕切板はH形鋼の代りに9mm厚の銅板を用いた。
- ii) 鉄筋カゴの縦継方式はAタイプでは重ね継手方式を用いたが、Bタイプでは写真-5に示す高張力ボルトによる継手方式を用いた。

§ 3. 試験施工

3-1 地質

試験施工に先立って実施したボーリング調査結果は図-6のとおりである。GL-1.7～-3.0mまでがシルト質粘土からなる沖積粘性土層、GL-3.0m以下が泥岩と細砂の互層からなる上総層群である。

GL-3.0～50.0m間の泥岩は代表的な箇所での一軸圧縮強度試験結果によるとほぼ同じような強度を示し、 $q_u = 45.8 \sim 64.1 \text{ kgf/cm}^2$ の範囲にある。細砂部分は全体的に粒子が均一で含水量が多い。透水係数は $k = 10^{-3} \text{ cm/s}$ 程度である。

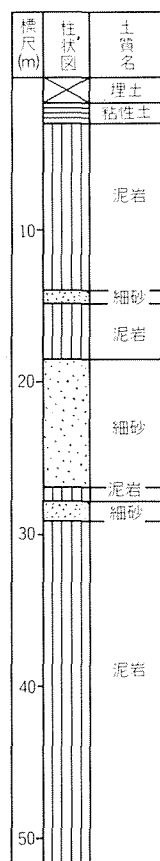


図-6 土質柱状図

3-2 試験規模

図-7の試験施工平面図に示すとおり、試験施工区間長は7.31mで、これをA、B、Cの3エレメントに分割した。壁厚は60cm、掘削深度はA、Bエレメントが50m、Cエレメントが55mである。

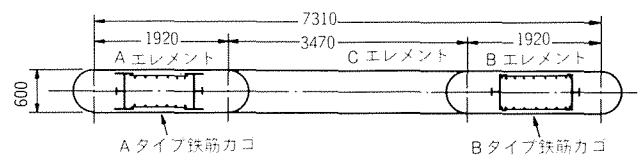


図-7 試験平面図

3-3 掘削工

掘削は掘削精度管理機構を装備したBW5580機を使用して、孔曲り量を測定しながら昼夜2交代の連続作業で行った。

掘削精度の制御は、検知した孔曲り量をもとに、掘削機の前後面の左右両端に備えた4個のアジャスタブルガイドによった。アジャスタブルガイドは運転席での遠隔操作により壁厚方向に出し入れすることによって掘削面を反力にして掘削機の姿勢（傾斜）を修正することができる。

安定液は地質が泥岩と細砂の互層であることを考慮して表-3の配合にした。

表-3 安定液の配合表

材 料	配合比(%)
清 水	100
ベントナイト	4
C M C	0.1
テルフロー	0.1

掘削順序はA、B、Cエレメントの順に行った。

Aエレメントでは今回開発した掘削精度管理機構をチェックするために、10m毎に掘削機を引き揚げて超音波溝壁測定器により、溝壁状態を確認して、掘削精度管理機構の水平変位量の出力結果との対比を行った。B、Cエレメントについては掘削終了後に超音波測定を行い溝壁状態を確認した。

掘削精度は壁厚方向について1/1,000（壁中心線の最大偏位／掘削深さ）を目標にしたが、結果は、Aエレメント1/550、Bエレメント1/610、Cエレメント1/1,500であった。A、Bエレメントで目標に達しなかった理由としては、

- ① 地盤が泥岩と砂の互層で層界面が傾斜している

② 掘削機自体がビットの回転反力により、前方へ偏位する習性をもっていた

③ このような掘削制御が困難な状況下で、掘削機にある程度の偏位を許し、管理限界偏位量（3cm：約 $1/1,500$ に相当）を超えたら強制的に修正しようと試みたが急激な偏位の修正は困難であった

ことが原因と考えられる。

このためCエレメントでは偏位が小さい初期段階で修正するようにした結果、目標精度を達成することができた。図-8はCエレメントの溝壁面の測定結果を示したものである。壁長方向については掘削機自体が制御機能を有しないため測定のみにとどめた。

壁面の掘削厚さは、平均63.8cmで約4cmの余掘り量であった。

掘削速度は砂層で5m/h、泥岩層で1～2m/hであった。

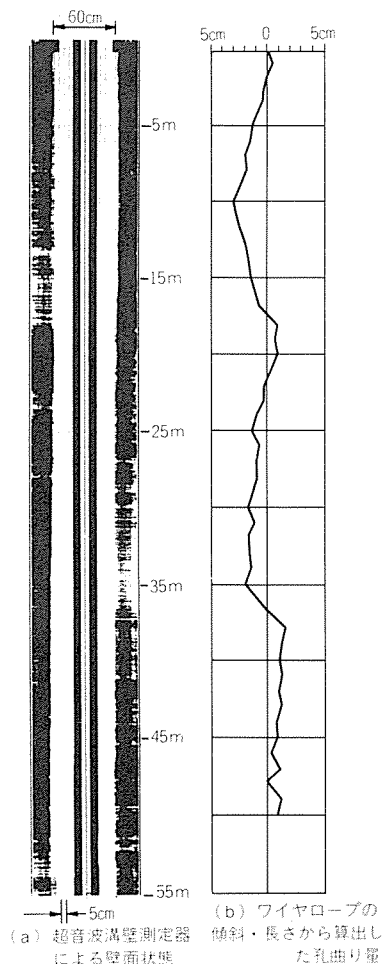


図-8 溝壁面測定結果

3-4 スライム処理

溝底の一次スライム処理は掘削終了後は掘削機を用いてサクションポンプにより行った。鉄筋カゴ建込み後は写真-6に示す界面計によりスライムの堆積状態を確認

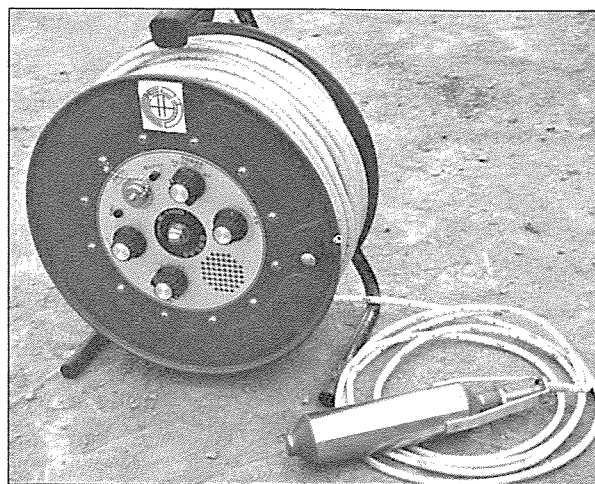


写真-6 NN型界面計



写真-7 仕切板スライム掃除具

して、トレミー管により二次スライム処理を計画したが、溝底にはほとんどスライムは堆積しなかった。

エレメント間継手の仕切板に付着したスライムの除去は止水性および構造的な面から重要なことであるが、写真-7に示す仕切板掃除機を用いた。仕切板掃除機は先ず先端の刃先で固結状スライムや異物を取除き、次にワイヤブラシとジェット水を併用しながら後処理をするもので仕切板に取付けたT形鋼をガイドとして下降するような仕組になっている。

3-5 鉄筋カゴの製作・建て込み

鉄筋カゴの製作は、長さ50mの鉄筋カゴを仮組みできる場所が現場内になかったため当社平塚工場で行った。

製作精度は地上で仮組みした状態で、Aタイプ鉄筋カゴで壁厚方向、壁長方向とも $1/10,000$ 、Bタイプ鉄筋カゴで壁厚方向 $1/6,000$ 、壁長方向で $1/4,000$ であり、目標精度 $1/3,000$ を満足することができた。製作精度に関しては、溶接ひずみ、形鋼の製品誤差（例えばH形鋼大曲りは長さの0.1%：JIS G3192）などを考えるとこれ以上は望めないと考えられる。

鉄筋カゴの建て込みはガイドウォール上に建て込み用案内架台を据付け、これに鉄筋カゴを嵌め込み、2方向からトランシットで鉛直度を確認しながらクレーンによる重心吊りで行った(写真-8)。また、鉄筋カゴの接続

は、前述の仮繋部材にテーパピンを打ち込んで仮組み時の真直度を復元したのち、溶接と高張力ボルト（Bタイプのみ）により剛結した。

建込精度の測定は予じめ取付けておいた計測用パイプを用いて挿入式傾斜計（FD-1,300T）で行った。測定結果の一例を図-9に示す。

図-9によると、壁長方向については仮組時の真直度を復元し且つほぼ鉛直（ $1/4,500$ ）に建て込むことができたが、壁厚方向については鉄筋カゴと壁面の間の余裕が少ないため掘削孔壁面の孔曲りに倣った形状に変形して建て込まれている。また、建込後の根固工及びコンクリート打設によってはほとんど移動しなかった。

建て込み所要時間は、Aタイプ約16時間、Bタイプ約12時間で、当初の予想の約2倍を要した。このうちの大部分が接続部の施工に費された。接続に要した時間は、Aタイプでは1ヶ所当り約2.5時間（ $\times 5$ ヶ所＝12.5時間、シート及び亜鉛引鉄板の接続と鋼材の溶接）、Bタイプでは1ヶ所当り1.5～2.0時間（ $\times 5$ ヶ所＝9時間、シート及び亜鉛引鉄板の接続と鋼材の溶接、高張力ボルト緊結）であった。

3-6 コンクリート打設

コンクリート打設はA、B両エレメントともにトレミ一管1本を用いて行った。両エレメントともに先ず鉄筋カゴ先端1mをコンクリートで根固めして養生後、上部の打設に移行した。養生後の打設面に堆積したスライム状のコンクリートはサクシオンポンプにより吸揚げて除去した。最初の予定では鉄筋カゴ両端の仕切板外側に25mm程度の砂利を仕切板の移動・変形防止の目的で投入する予定であったが、検討を加えた結果、打設速度を落すことでこれを省略できるという結論を得た。このため、砂利投入を省略して打設速度約10m/hで打設したが仕切板等に異常はみられなかった。また、砂利を投入しないでコンクリートを打設した場合、鉄筋カゴの変形が心配であったが、図-9に示すようにコンクリート打設後の挿入式傾斜計による測定ではほとんど影響はみられなかった。

コンクリート打設後、コアボーリングを行ってコンクリート供試体を採取して圧縮強度試験を実施した。使用したコンクリートの配合は表-4、圧縮強度試験の結果は表-5のとおりである。圧縮強度(σ)は、 $\sigma=311\sim371$ kgf/cm²（平均355kgf/cm²、不偏分散の平方根25kgf/cm²）

でいずれも設計強度を上廻った。

表-4 コンクリートの配合表

呼び強度	配合 (kg/m ³)					
圧縮強度300kgf/cm ² スランブ 18cm 骨材最大寸法 25mm	セメント	水	細骨材	粗骨材	砕石	混和材
	389	173	750	705	301	0.078
	水セメント比		44.5%		細骨材率 42.9%	

表-5 コンクリート試験結果

供試体 採取位置	単位体積 重量 (kg/m ³)	圧縮強度 (kgf/cm ²)	静弾性係数 (kgf/cm ²)	ポアソン比
GL-5.0m	2320	311	2.73×10^5	0.194
GL-10.0m	2340	357	2.61×10^5	0.204
GL-14.0m	2350	336	2.69×10^5	0.221
GL-17.0m	2360	371	2.96×10^5	0.215
GL-20.0m	2420	368	3.14×10^5	0.190

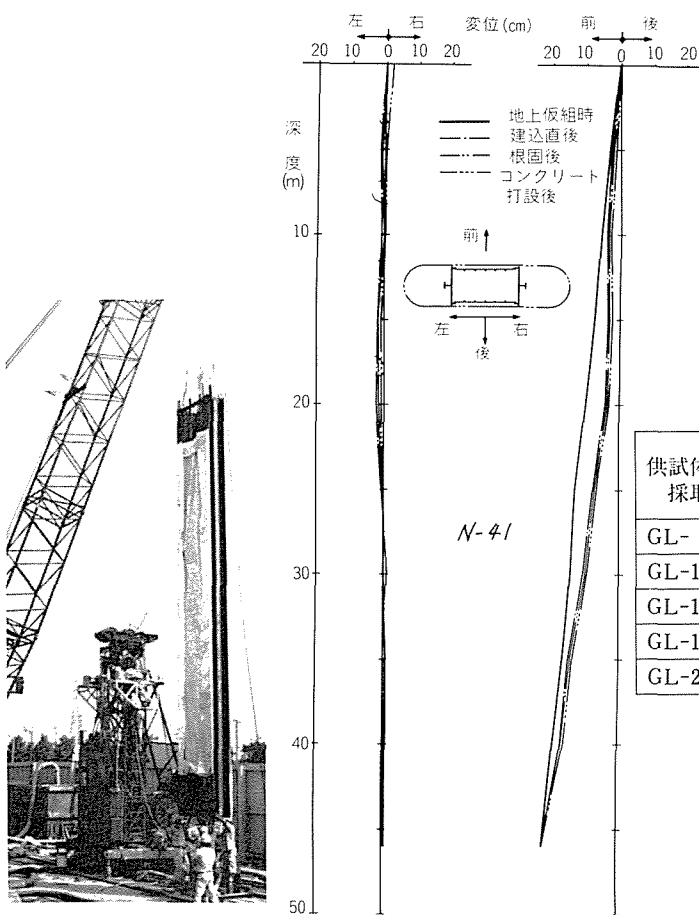


写真-8 仕切板付鉄筋カゴ建て込み作業

図-9 挿入式傾斜計による仕切板建て込み精度

§ 4. まとめ

今回の試験施工は大深度地下連続壁における掘削精度管理とエレメント間継手の2点に重点をおいて実施したが、それぞれ次のような成果を納めることができた。

(1) 掘削精度管理

地質が硬質土（泥岩）と砂層の互層でしかも層が傾斜しているため、孔曲りの修正に多少悩まされたが、ワイヤロープ方式による掘削精度管理方法によって十分高精度の掘削が可能であることがわかった。

試験掘削結果（深さ55m）によると、孔曲り量は鉛直線を中心に3cm程度の範囲内で左右交互に発生している（図-8参照）。これは孔曲りが発生しても制御機能が働いた結果と考えられる。従って100m程度の大深度となっても孔曲り量は累加的に増加するのではなく、一定の範囲内で孔曲り量を制御しながら掘削が可能といえる。また一方、大深度の掘削を行うときの掘削機の大形化に伴い姿勢制御機能の向上（重量増による安定性向上、アジャスタブルガイドの大形化、設置数増加など）が期待できる。

これらを考え合せると本方式で精度管理を行えば100m程度の大深度となっても、十分高精度の掘削、例えば最大孔曲り量5～10cm（精度1/1,000～2,000）程度の掘削が可能と云える。

(2) エレメント間継手

- i) 仕切板付鉄筋カゴは高精度の真直度（1/3,000程度）で製作および仮組立が可能である。
- ii) 建て込みはクレーンによる重心吊方式で十分鉛直性は確保可能で、且つ分割した鉄筋カゴを建て込み時に接続する時、仮繫材により仮組時の真直度を復元することが可能である。
- iii) 仕切板及びシートはコンクリート打設により、移動・変形・破損がなかった。
- iv) エレメント間継手からは漏水がなく、仕切板に付着したスライムはワイヤブラシ及びジェット水により除去できたと考えられる。

以上の結果から大深度地下連続壁における一連の工程の中で最も重要と考えられる高精度掘削とエレメント間継手については十分信頼性の高い施工が確立できた。今後は今回の試験でできなかったガイド杭方式及び掘削機の改良に重点を置いて、より経済的で品質の高い大深度地下連続壁工法の確立をはかりたい。

最後に本試験施工にあたって新横浜出張所、平塚工場、技術研究所、建築技術課の皆様から御協力を頂いたことを申し添えます。

参考文献

- 1) 日本建設機械化協会編「地下連続壁工法設計施工ハンドブック」技報堂
- 2) 藤井、植田、堀井、森「地下連続壁工法の理論と実際」山海堂
- 3) 神戸「大深度地下連続壁工法とその実施例」地下連続壁工法④P. 9 総合土木研究所
- 4) 堀田、寺田「大深度地下連続壁—WH工法」地下連続壁工法④P. 28 総合土木研究所
- 5) 後藤、峯岸「大深度地下連続壁工法の利用（袖ヶ浦）」基礎工VOL. 8 NO. 11 P. 23 総合土木研究所
- 6) 御牧「大深度地下連続壁工法の利用（扇島）」基礎工VOL. 8 NO. 11 1980 P. 29 総合土木研究所
- 7) 「特集大深度地下連続壁工法」建設の機械化'80. 10. 日本建設機械化協会