

大深度・厚壁地中連続壁掘削精度管理システムの開発 (システムの概要および実工事への適用)

Development of a Excavation Accuracy Control System for Deep & Thick Diaphragm Wall (Outline of the System and Practical Applications)

武井 正孝*	西 保*
Masataka Takei	Tamotsu Nishi
熊谷 健洋*	小栗 利夫**
Takehiro Kumagae	Toshio Oguri
田中 勉**	
Tsutomu Tanaka	

要 約

大深度・厚壁地中連続壁実験工事（平成5年度に実施）の中で開発した掘削精度管理システムを、2つの実工事に導入した。今回の導入にあたり3タイプの精度管理架台を製作した。本報文では、最初に本システムの概要を説明する。

続いて、実工事におけるシステムの使い勝手（架台の設置手間、片吊りの影響、データ送信の確実性）について考察する。

本システムで検知した掘削機の変位と超音波溝壁測定器による溝壁測定結果の傾向は、概ね一致した。また、検知変位の“揺れ”は、主として位置検知用ワイヤの揺れに起因するものであり、その揺れの程度は、溝内安定液の水面付近の水平方向流れやB型粘度の大きさに影響されることが確認された。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. システムの概要
- § 3. 実工事での適用結果
- § 4. おわりに

§ 1. はじめに

地中連続壁工事における掘削精度は、出来形や施工性に大きな影響を与える。特に大深度の場合には、工事の成否を制すると言われている。

平成5年度に、大深度・厚壁地中連続壁実験工事を実施し、その中で掘削精度管理システムの開発を行った¹⁾。

幸い、本システムを実施工に導入する機会を得た。導入するにあたり、実験工事の成果を踏まえ、実施工向けのシステムを製作した。

本システムの中核部は、精度管理架台である。今回は3タイプの架台を製作し、実工事に導入した。

本報文では、最初に、本システムの概要を説明する。

続いて、実工事への適用結果の報告として、下記の事項について考察する。

- ①システムの使い勝手。
- ②システムの掘削データと超音波溝壁測定データの比較。
- ③溝内安定液の性状（流れ、比重・粘性）の精度管理への影響。

* 技術研究所土木技術課

** 技術研究所機電課

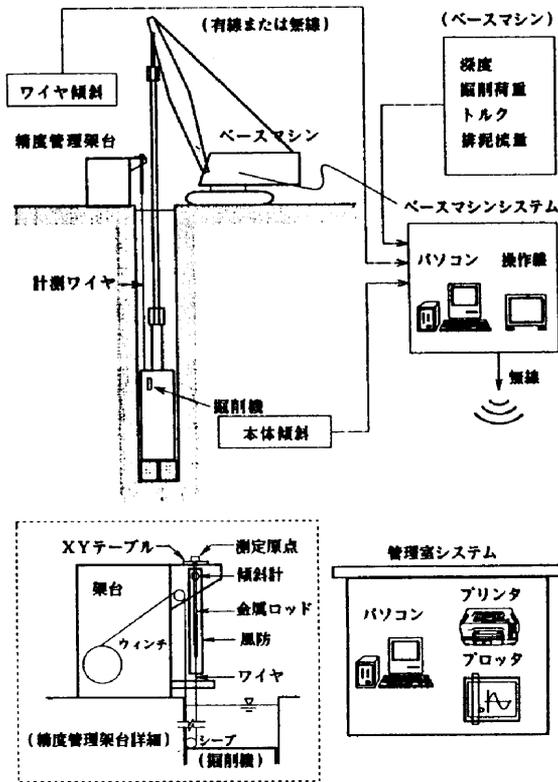


図-1 掘削精度管理システムの概要

§ 2. システムの概要

システムの概要を図-1に示す。本システムは、地中連続壁掘削中に、リアルタイムに掘削機の位置および姿勢を検知し、かつその情報をベースマシンのオペレータにフィードバックするシステムである。

掘削機の位置・姿勢の検知は、掘削溝上に設置した精度管理架台の測定原点（不動点）と溝中の掘削機の間位置検知用のワイヤを張設し、そのワイヤの長さ

と傾斜角から水平変位を算出する方法で行う^{1), 2)}

本システムは、精度管理架台、ベースマシンシステムおよび管理室システムから構成される。次にそれぞれの概要を説明する。

2-1 精度管理架台の概要

精度管理架台の役割は、架台と掘削機の間張設されるワイヤに一定の張力を与え、かつその傾斜角を測定することである。

精度管理架台は、傾斜計、金属ロッド、ウィンチ、ジナルユニットなどから構成される。これら各要素部分の仕様・性能等については、前回の報告¹⁾で考察している。

掘削機の水平変位量を2方向に分けて求めるために、ワイヤ（金属ロッド）には、壁長方向（X方向）と壁厚方向（Y方向）の2方向それぞれに傾斜計を設置している。また、掘削機の水平面内の回転角（スピン）も検知するために、ワイヤは掘削機頭部の2箇所に張設する。

今回の本システムの実現場への導入にあたり、3タイプ（タイプⅠ、Ⅱ、Ⅲ）の精度管理架台を製作した。この3タイプの架台の主な相違点は、架台の台数、設置位置およびワイヤ張設位置である（表-1参照）。各架台の概要図を図-2～図-4に、写真を写真-1～写真-3に示す。

その他、精度管理架台の主な特長を以下に示す。

- ①掘削対象ガットの掘削中途における架台の退避および復帰は、スライド装置により行う。このため、掘削を中断し、掘削機を一旦上げる場合にも、架台の位置決めをしなおす必要がない。
- ②架台は3点支持方式なので、水平の調整が容易であり、設置後のガタつきもない。
- ③溝内安定液の水位管理用の液面計を取り付けることが

表-1 精度管理架台の概要

	タイプⅠ	タイプⅡ	タイプⅢ
台数	1台	2台	2台
重量(1台あたり)	約6ton	約2.5ton	約4ton
寸法(1台あたり)	幅 2.4m×長さ 3.3m×高さ3.15m	幅 1.1m×長さ 2.0m×高さ2.57m	幅1.45m×長さ2.25m×高さ2.36m
架台の設置位置とワイヤの張設位置 (●ワイヤ(ロッド側)) (○ワイヤ(ウィンチ側))	<p><ベースマシン側></p>	<p><ベースマシン側></p>	<p><ベースマシン側></p>

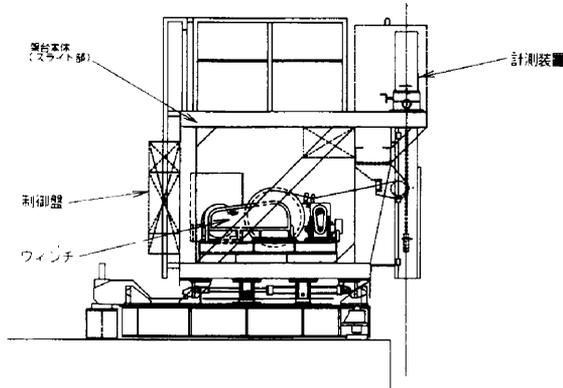


図-2 精度管理架台 (タイプⅠ)

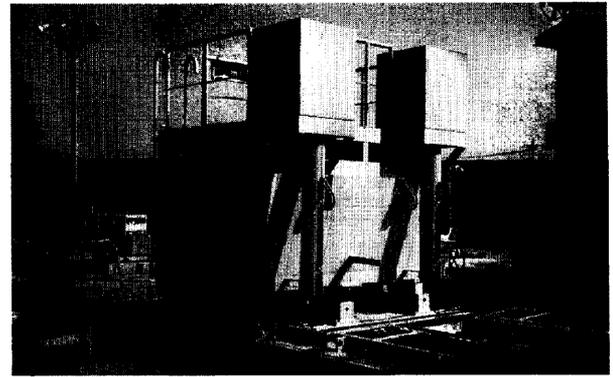


写真-1 精度管理架台 (タイプⅠ)

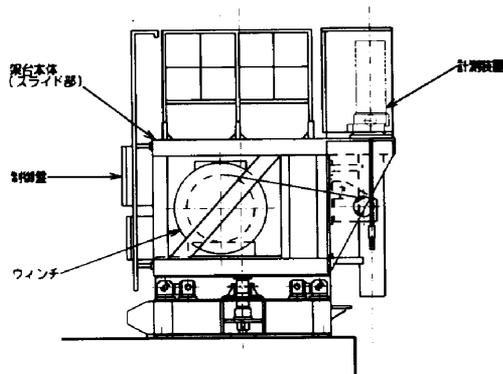


図-3 精度管理架台 (タイプⅡ)

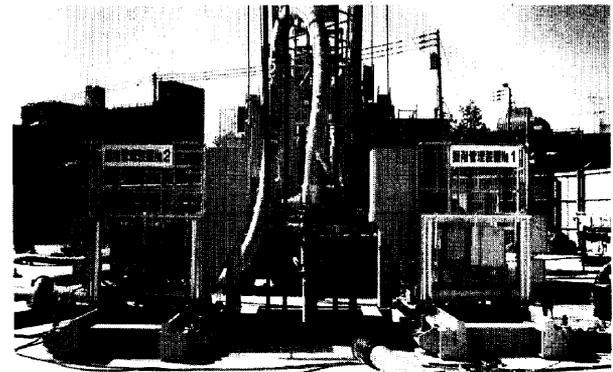


写真-2 精度管理架台 (タイプⅡ)

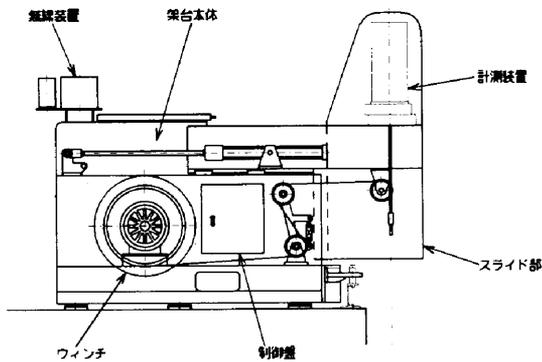


図-4 精度管理架台 (タイプⅢ)



写真-3 精度管理架台 (タイプⅢ)

できる (オプション)。

- ④タイプⅢでは無線によるデータ伝送システムを搭載している。
- ⑤タイプⅡおよびⅢは、壁厚により使用が制限される可能性は低い。

2-2 ベースマシンシステムの概要

(1) 機能

ベースマシンシステムは、主として各センサーの測定結果の処理を行うシステムである。

掘削中は、下記の作業を繰り返し行う。

- ① (信号取込) 精度管理架台・掘削機・ベースマシンの各センサーの信号を取り込む。
- ② (計算・処理) ①で取り込んだ信号を掘削機の位置・姿勢に関する情報に変換する。
- ③ (表示・送信) 各センサーの信号および②の情報等をベースマシンのモニタ画面に表示する。また、管理室等に無線送信する。
- ④ (データ保存) 各センサーの信号および②の情報等を

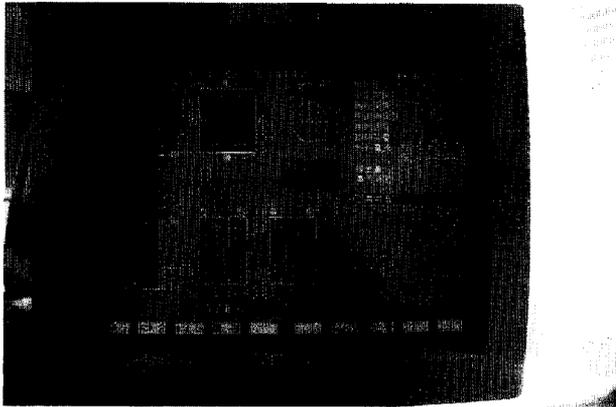


写真-4 モニタ画面の表示状況

無線ユニットは、計測・処理した各データを管理室等に送信するためのものである。

なお、傾斜計電源、無停電電源、パーソナルコンピュータ等は、まとめてシステムラックに収め、ベースマシンのサブキャビンに設置する。

2-3 管理室システムの概要

管理室システムは、無線ユニット、パーソナルコンピュータ（本体・モニタ画面・ハードディスク）、プリンタ、プロッタ等で構成される。

本システムでは、ベースマシンシステムから無線送信された情報を受信し、モニタ画面に表示を行う他、受信した情報を、所定の様式で出力する。

2-4 掘削機変位の計算方法

本システムにおける掘削機変位およびスピン（水平面内回転角）の計算方法を、架台のタイプ別に図-5に示す。

本システムでは、2箇所のワイヤ取付点（A、B）の変位量から、掘削機天端面の中心点（C）の水平変位量を計算し、掘削機の変位とする。計算は、A、B、C点の相対的な位置関係は変わらないものとし、厳密計算により行っている。タイプIとタイプIIの変位の計算では、最終的に2次方程式を解くことが必要となる。一方、タイプIIIの変位の計算では、A、B点の変位の平均を取るのみである。

§ 3. 実工事での適用結果

3-1 工事概要

本システムを導入した工事（2箇所）の概要を以下に示す。

ハードディスク等に保存する。

また、掘削開始前には次の作業等を行う。

- ① 各センサーの係数・初期値等の設定
- ② ワイヤの垂直方向チェック
- ③ 掘削するエレメント・ガットの指定

(2) ハードウェア

ベースマシンシステムは、傾斜計の電源、パーソナルコンピュータ、無停電電源、モニタ画面、オペレータ操作盤、無線ユニットなどのハードウェアから構成される。

モニタ画面は、掘削機の姿勢等を、オペレータに対し表示するものであり、運転席に設置される。掘削中のモニタ画面表示状況を写真-4に示す。

オペレータ用操作盤は、オペレータがシステムの操作（電源の投入・切断、エレメント・ガットの指定、システムの状態（掘削中・待機中）の切り換えなど）を行う時に使用するものである。タッチパネル方式であり、運転席の脇に設置される。

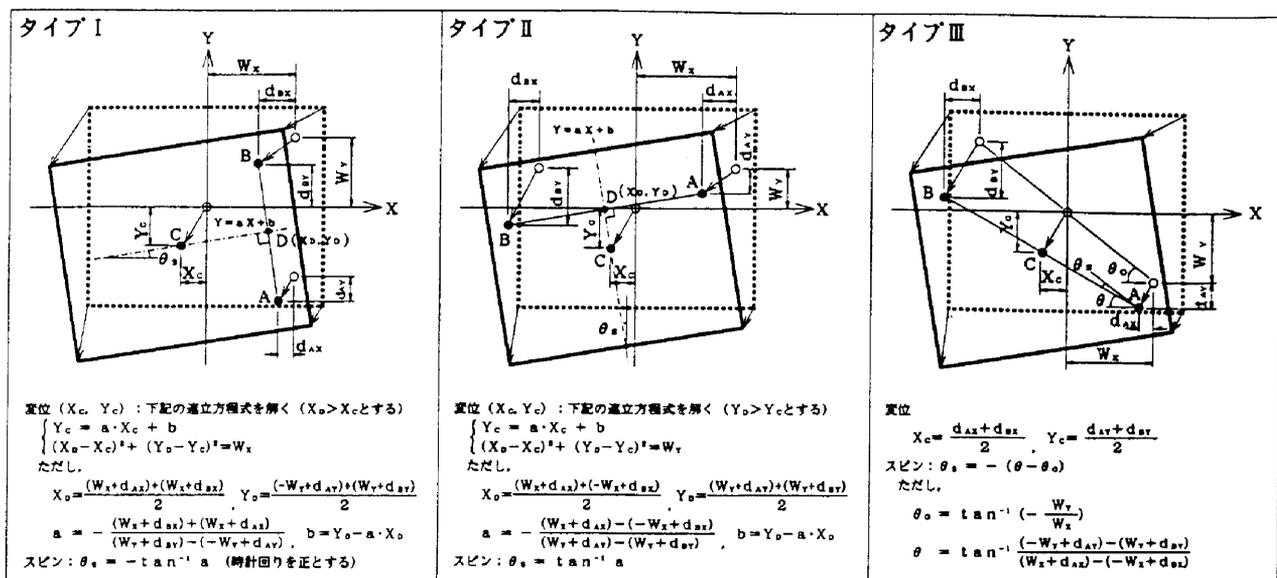


図-5 掘削機の変位およびスピンの計算方法

(a) 工事名：外郭放水路第3立坑新設工事

工事場所：埼玉県春日部市

連続地中壁の概要

立坑外径：40.8 m

深 度：140 m

壁 厚：2.1 m

掘削土量：35,942 m³

エレメント割：先行14エレメント (1エレメント当たり3ガット)

後行14エレメント (1エレメント当たり1ガット)

(b) 工事名：谷町筋管路新設工事

工事場所：大阪府大阪市

連続地中壁の概要

立坑外径：25 m

深 度：88.1 m

壁 厚：1.3 m

掘削土量：8,700 m³

エレメント割：先行9エレメント (1エレメント当たり3ガット)

後行9エレメント (1エレメント当たり1ガット)

なお、工事に使用した掘削機は、両工事とも、水平多軸型ドラムカッター式掘削機（株利根製EMX-240）である。

また、使用した精度管理架台は、(a)の工事ではタイプⅠおよびタイプⅢであり、(b)の工事では、タイプⅡである。

3-2 システムの使い勝手について

(1) 架台の設置手間について

掘削するガットを変える時には、精度管理架台を所定の位置に据え、測定原点（ワイヤ）の位置も所定の位置に正確に合わせなければならない。

各架台の設置にあたっては、掘削溝上に設置される口切りガイドに設けた位置決めブロックに合わせて設置するようにしたため、比較的容易に設置することができた。

架台の台数は、タイプⅠは1台で、タイプⅡとⅢは2台であるが、上記の設置方法に従えば、台数の違いによる設置手間の差は、特に考える必要はないと思われる。

また、タイプⅡ、Ⅲの架台において、この他に、架台の台数が2台であることによる施工上の不都合は、特になかった。

(2) 片吊りの影響について

掘削機と精度管理架台を結ぶワイヤには、約100kgf (980N) の張力をかけている。ワイヤは2箇所往復で設置されるので、掘削機は上向きに約400kgf (3,920N) の力で引っ張られていることになる。タイプⅡおよびⅢでは、掘削機の中心点について対称にワイヤが設置されるが、タイプⅠでは、掘削中は、いわゆる“片吊り”の

状態になる。

タイプⅠの架台を使用して掘削したオペレータによると、“片吊り”のためにうまく掘削できないということはないものの、多少の注意は必要とこのことであった。

(3) 架台ベースマシン間の信号の送信方法について

架台からベースマシン（システムラック）への計測データの送信方法は、タイプⅠとⅡの架台では有線（50 mのケーブル）とし、タイプⅢの架台では、無線・有線（20 mのケーブル）両用とした。

無線に比し、有線の方がより直接的で確実性も高いであろうという見込から当初は有線を採用したが、作業中にケーブルが損傷し送信できなくなったり、機器管理上の問題からケーブルコネクタ部に雨水等が侵入し、短絡を起こすといったケースが見られた。

これらの対策として、タイプⅢでは無線方式を採用したが、工事箇所が国道脇でCB無線の混信や工事機械からのノイズなどが懸念されたため、有線方式としても使用できるものとした。

タイプⅢ架台の使用は、1カ月程ではあったが、この間、システムの停止、データの欠落等の現象は全く見られなかった。これには、架台、ベースマシンの無線機間距離が短いことも有利に働いていると思われる。

今後は、無線送信の長期安定性の検証、確認を行いたい。

3-3 システムの測定と超音波溝壁測定との比較

本システムによる掘削データの例を図-6に示す。本図に示した変位は、図-5に示した方法で算出した掘削機天端レベルでの変位に、掘削機本体の傾斜分の変位を加えた掘削機先端（ドラムセンター）レベルでの変位である。ただし、データは初回掘削時のもののみとし、リーミング（修正掘削）時のデータは除いている。

また、図中には、システムによる計測とは別に行った超音波溝壁測定器による溝壁の測定結果を併せて示している。（なお、超音波溝壁測定器による測定結果は、感光紙へのアナログ出力のみしか行われ、本図は、デジタイザーを使って測定結果を読み取り作図した。）

両者の傾向は概ね一致していることから、本システムによる測定結果は、少なくとも超音波溝壁測定器と同等の信頼性を有すると考えられる。

ところで、図-6からもわかるように、本システムによる測定結果は、ある程度の揺れ幅を持っている。

本システムを現現場で使用する中で、時によっては、この揺れ幅がかなり大きくなるがあった。その原因としては、次の事などが考えられる。

①掘削機の振動

②ワイヤ張力の変動

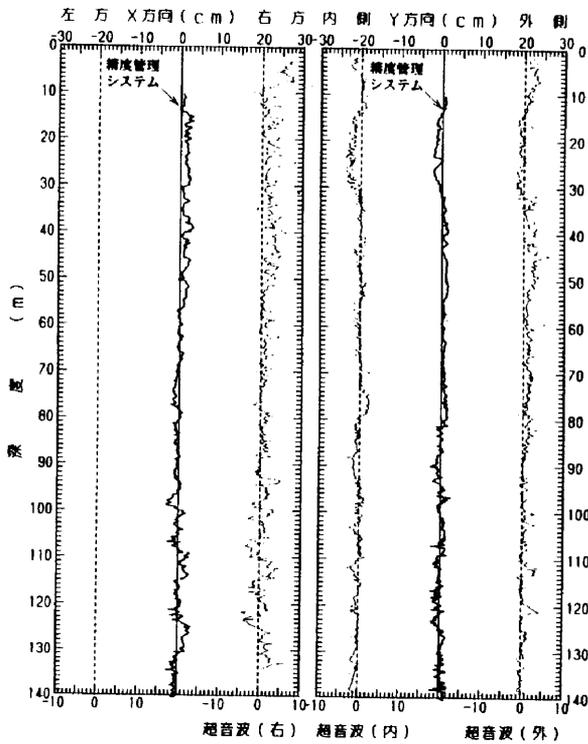


図-6 精度管理システムによる掘削機の変位と超音波による溝壁測定結果

③電氣的ノイズ

④地面から精度管理架台に伝わる様々な振動

⑤安定液の性状

⑥掘削速度

⑦土質

上記のほとんどのものが、現場の状況により大なり小なり変動すると考えられる。これらの影響を少なくする方法として、システム自体を改良し、影響を受けないようにする方法と、要因の方を排除または適性に管理し、悪影響を与えないようにする方法の2つが考えられる。

次節では、⑤の安定液の性状について後者の検討を行う。

3-4 安定液性状の掘削精度への影響に関する考察

回転式掘削機による掘削の場合には、安定液を循環させて掘削を行うので、溝内には安定液の流れが生じている。したがって、ワイヤはその流れに押されることにより揺れを生じるものと考えられる。また、安定液の流れがワイヤを押すのであれば、その力は、流速の他に、媒体である安定液の比重・粘性の影響も受けるはずである。

以上のことから、安定液の性状として、①安定液の流れ、②安定液の比重・粘性の2つについて、ワイヤ傾斜角測定データの揺れへの影響について検討した。

なお、本節の検討は、全てタイプIの架台について行

っている。

(1) 安定液の流れの影響に関する検討

①掘削するガットの違いによる影響

先行エレメントを立坑外側から掘削した場合、システムが検知した掘削機変位の揺れ幅を比較すると、1ガット掘削時の揺れ幅が最も小さく、2ガットおよび3ガットのそれは1ガットに比べて大きいという傾向であった。

タイプIの架台を用いて、ベースマシンを立坑外側に設置し、先行エレメントを掘削する場合の架台の設置位置および測定原点(ワイヤ)の位置を、図-7に示す。

1ガット掘削時には、2本のワイヤは、掘削溝(開口部：図-7の斜線内)の端部に位置するが、2ガットおよび3ガット掘削時には、開口部の中央付近に位置する。したがって、2ガットおよび3ガットのワイヤは、位置的に考えても安定液の水平方向の流れの影響を受けやす

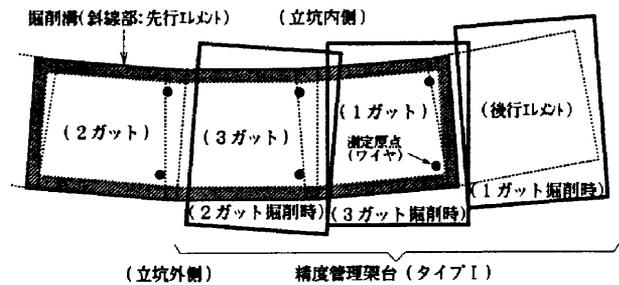


図-7 先行エレメント掘削時の精度管理架台(タイプI)の設置位置(立坑の外側から掘削する場合)

いと考えられる。

③ワイヤの揺れの計測方法

(a)の現場において、安定液の流れによるワイヤの揺れの計測を行った。

計測の概要を図-8に、計測ケースを表-2に示す。計測は、先行エレメントの第2ガットにおいて、掘削中と同様に架台を設置し掘削機を掘削済深度まで沈めた状態で行った。変位計測装置として、レーザー変位計を用いた。レーザー変位計を、図-8に示すように、梯子状に組んだフレームを用いて設置した。計測時間はおよそ20分とした。また、計測中は、掘削は行わず、安定液の供給・排出のみを掘削時と同じサイクルで行うのみとした。

なお、計測は、表-2に示すように、安定液供給口の位置・数を変えたり、仕切り鉄板を設置する等、安定液の流れを抑える対策を施した場合も含めて6ケースについて行った。図-8中に、各ケースの安定液供給口の位置を示している。

③計測結果

計測結果として計測変位の時間変化を図-9に示す。

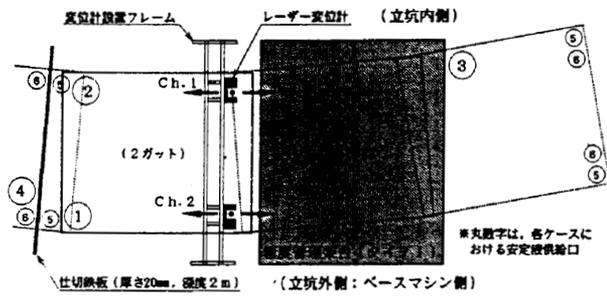


図-8 溝内安定液の流れの影響によるワイヤの揺れの計測概要

表-2 計測ケース (安定液の流れの影響の検討)

ケース	安定液の供給口の位置	備考
1	手前左側 (1箇所)	実施日: '94.7.21. 場所: (a)の工事
2	遠方左側 (1箇所)	掘削機: 2号機
3	遠方架台後方 (1箇所)	
4	手前左側 (1箇所: 鉄板を介す)	実施日: '94.8.23 場所: (b)の工事
5	4箇所	掘削機: 3号機
6	4箇所 (内2箇所は鉄板を介す)	

なお、計測変位は掘削機頭部レベルでの変位に換算している。また、図中の破線で示した時刻は、安定液の供給を開始した時刻である。

ケース1, 2では、2本のワイヤの内、安定液の供給口に近い方のワイヤが特に大きく揺れており、最大で数mmの変位が生じている。また、安定液の供給・排出によりワイヤ変位は周期的に変動している。

ところで、図-10は、ある先行エレメントの2ガットの掘削中に、掘削精度管理システムが計測したワイヤ傾斜角 (変位) の時間変化である。図-9のケース1, 2と図-10のグラフの形状は、非常に類似している。このことから、安定液の供給排出によるワイヤの揺れが、システムで計測したデータの揺れの主要原因であるものと推測される。

ケース3~6は、安定液の流れの影響を少なくするために、何らかの対策を施したケースであるが、いずれもケース1, 2より、ワイヤの揺れは小さくなっており、安定液の流れの影響を低減させる対策が、それぞれ効果があったことを示す結果といえる。

特に、ケース1とケース4を比較すると、ケース4ではかなり揺れが小さくなっている。ケース4で用いた鉄板は水深2mまでしか達していないことから、掘削溝の表面付近の流れがワイヤの揺れに大きく影響しているものと推測される。

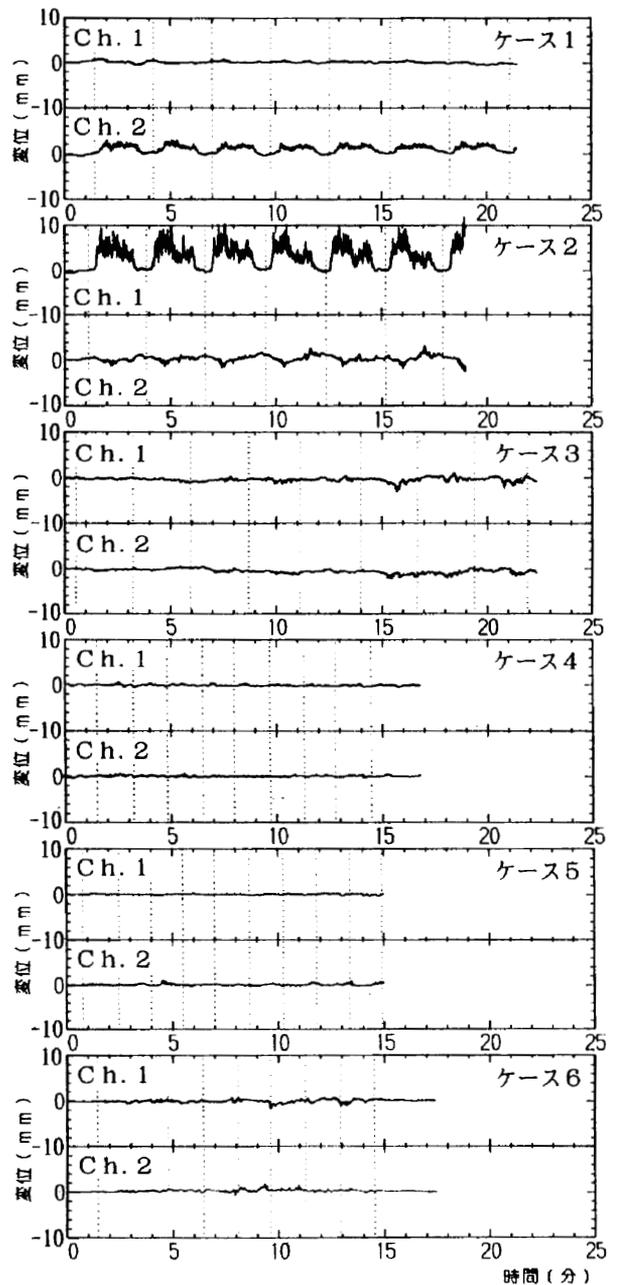


図-9 測定変位の時間変化 (計測変位は掘削機頭部レベルでの変位に換算)

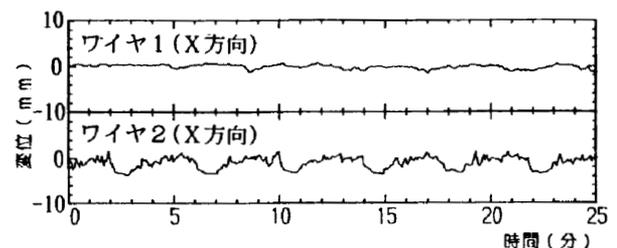


図-10 掘削中のワイヤ傾斜角 (掘削機頭部レベルでの変位に換算) の時間変化 (掘削精度管理システムによる計測データ)

なお、今回実施した対策以外にも様々な対策が考えられるので、今後さらに、簡易な方法でできる限り揺れを小さくできる対策を検討する必要がある。

(2) 安定液の比重・粘性の影響に関する検討

①実験方法

本検討は、掘削中に、安定液の再生の時期を遅らせることなどにより、一時的に溝内安定液の比重・粘性を大きくし、その時のワイヤの揺れの程度と安定液の比重・粘性との関係を調べたものである。

“ワイヤの揺れの程度を表す指標”（以後“揺れ指標”とする）としては、図-11に示す方法で求めた標準偏差 σ を用いた。

また、安定液の比重・粘性は、試料を採取し、それぞれの試験器により測定した。

なお、本検討は、前項で検討した安定液の流れの影響が最も少ないと考えられる各先行エレメントの1ガットにおいて、様々な掘削深度において行った。

②実験結果

揺れ指標（X方向）と安定液の比重および粘性（B型粘度）の関係を図-12に示す。比重、B型粘度とも、その値が大きいほど、揺れ指標も大きくなる傾向が伺われるが、比重の場合はかなりバラつきが大きい。一方、B型粘度の場合は、バラつきが小さく比較的明瞭な傾向が現れている。

以上のことから、ワイヤの揺れを抑えるためには、B型粘度を可能な範囲で小さく抑えることが必要であると考えられる。

特に、深度の大きい所ではワイヤの揺れが増幅されること、また、ワイヤが掘削溝（開口部）の中央部に位置する場合には、前項①で考察したように、安定液の流れの影響が大きいことから、B型粘度が大きくなるように十分注意する必要があると思われる。今後、具体的

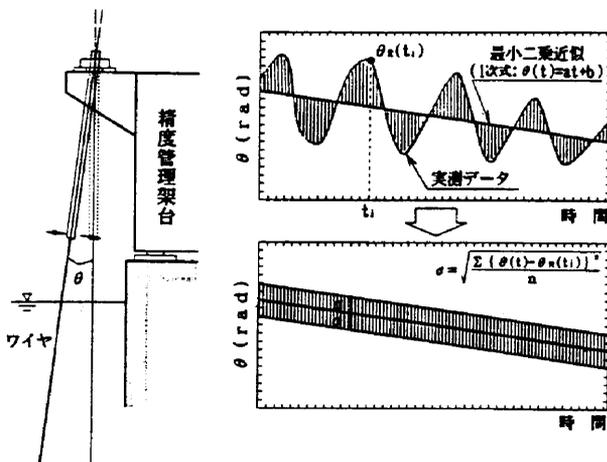


図-11 ワイヤの揺れの程度を表す指標の算定方法

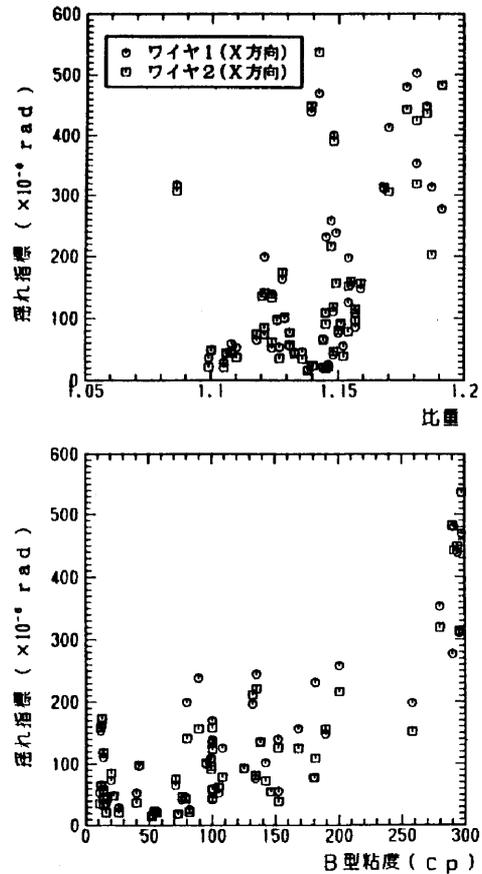


図-12 安定液の比重および粘性（B型粘度）と揺れ指標との関係

なB型粘度（粘性）の管理範囲を明らかにしたい。

§ 4. おわりに

本報では、大深度・厚壁地中連続壁用の掘削精度管理システムの概要を紹介し、実現場への導入過程で行ったいくつかの検討の概要を報告した。

今回本システムを導入した2つの現場では、本システムにより、概ね高精度を保ちながら掘削を行うことができた。

最後に、本システムの実現場への導入にあたり、ご指導ご協力頂いた関係各位に、謝意を表す。

参考文献

- 1) 西他：大深度・厚壁地中連続壁実験報告（その1）、西松建設技報、Vol.17、pp.17～24、1994。
- 2) 平野他：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、西松建設技報、Vol.4、pp.1～9、1981。