

# 大深度・厚壁地中連続壁実験報告（その1） （掘削精度管理装置の開発および掘削能率の分析）

## Field Test Report of Deep & Thick Diaphragm Wall(Part1) (Development of Excavation Accuracy Control System and Analysis of Excavating Efficiency)

西 保*	中山 肇**
Tamotsu Nishi	Hajime Nakayama
中島 利美***	佐藤 桑次****
Toshimi Nakajima	Kumeji Satou
細井 武*****	玉越 正宏*****
Takeshi Hosoi	Masahiro Tamakoshi
坂本 隆一郎*****	熊谷 健洋*****
Ryuichiro Sakamoto	Takehiro Kumagae
小栗 利夫*****	武井 正孝*****
Toshio Oguri	Masataka Takei

### 要 約

深度150m級の大深度地中連続壁を想定して、掘削精度管理装置を開発し、実物大実験で性能を確認した。本装置は、地上の基準点と地中の掘削機の間、長さ約2mのロッドを介して張設したワイヤーの「傾斜角度」と「長さ」から掘削位置を算出する方式を用いたものである。ロッドとワイヤーの組合せが測定精度向上に好影響を及ぼすこと（深度150mにおける5cmの強制変位量に対して4.6～5.0cmの測定値を得た）を実証できた。また、ワイヤー傾斜角は安定液流や機械振動および切削反動の影響によって、周期数秒、振幅数分の角振動を呈したが、数秒間の平均値を取ることで平滑化することができた。掘削中の深度～変位曲線は、超音波溝壁測定機による測定結果とよく一致し、高精度に掘削機の位置検知が可能であることを確認した。さらに、地盤掘削およびコンクリートカッティング等のデータの収集・分析を行い、掘削能率とビット荷重、土性、コンクリート強度との関係を明らかにすることができた。

### 目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 実験工事の概要
- § 3. 掘削精度管理システムの開発
- § 4. 掘削能率の分析
- § 5. おわりに

### § 1. はじめに

地中連続壁技術は昭和30年代にわが国に導入されて以来、長足の進歩を遂げた。例えば、壁厚3m、深度100m以上の大深度・大壁厚化、地下ダム等のための薄壁化、耐震壁や橋脚基礎としての継手構造の開発など飛躍的な進歩を遂げている。

しかし、大深度・大壁厚化に注目した場合、今だに施工実績が少なく、技術的にも完成されていないのが現状である。深度100mを越えると、従来技術の延長線上では説明できないような現象が多く発生すると言われている。

今後、益々ニーズの増加が予想されるこの分野で、壁

- 
- \* 技術研究所土木技術課長
  - \*\* 東関東(支)外郭春日部(出)所長
  - \*\*\* 機材部副部長
  - \*\*\*\* 機材部機械課副課長
  - \*\*\*\*\* 土木設計部長
  - \*\*\*\*\* 土木設計部設計課
  - \*\*\*\*\* 技術研究所土木技術課係長
  - \*\*\*\*\* 技術研究所機電課
  - \*\*\*\*\* 技術研究所土木技術課

厚2.1m、深度150mの大深度・厚壁の地中連続壁の実験工事を実施し、机上の研究では得られない多くの成果を得た。本報ではその成果の一部として、高精度掘削管理装置の開発および掘削能率に関する分析結果を報告する。

## § 2. 実験工事の概要

実験は、千葉県船橋市の当社東関東(支)機材センター内において、平成5年3月～7月に実施した。実験規模は、壁厚2.1m、深度50m～150mの3エレメントの掘削である。No.1エレメントは、深度50mの2ガットと深度100mの1ガットからなる複数ガット（3ガット）のラップ掘削を行うエレメント、No.2エレメントは深度150mの大深度エレメント、No.3エレメントはNo.1～No.2の端部コンクリートを台形状にコンクリートカッティング掘削を行うエレメントである。掘削機は(株)利根製のEMX-240を用いた（図-1参照）。

地質は、表層約3mが埋立層、その下部GL-26mまでが有楽町層と呼ばれる沖積層（上部は緩い砂層、下部は軟弱な粘土層）である。また、GL-26m～GL-32mは7号地層と呼ばれるN値が4～7の洪積粘土層であり、GL-32m以深はN値が50以上の洪積砂層である。

主な実験項目は、掘削中の周辺地盤の挙動計測（間隙水圧、変形）、掘削能率に関する要因特性の把握、掘削精度管理装置の開発、大深度にトレミー管を用いて打設されるコンクリートの特性把握、安定液の性状管理手法の開発、安定液自動計測装置の開発実験等である。

## § 3. 掘削精度管理システムの開発

掘削精度は、出来形や施工性に大きな影響を与える。大深度掘削では工事の成否を制すると言われている。超音波溝壁測定装置が信頼性のある測定方法とされているが、掘削作業を中断して掘削機を引上げて測定しなければならない。これは、100mを越える大深度施工では、著しい施工能率の低下につながる。

上記の対策として、各社が独自の掘削機位置検知装置を開発しているが、まだ改良の余地がある。今回、当社独自の掘削精度管理装置を開発し、その性能を確認したので、その概要を紹介する。

### 3-1 西松式掘削精度管理システムの概要

西松式掘削精度管理システムは、掘削機の位置検知を行うとともに、ドラム荷重、カッターモータ電流値、排泥流量などを計測し、これらの情報をリアルタイムにオペ

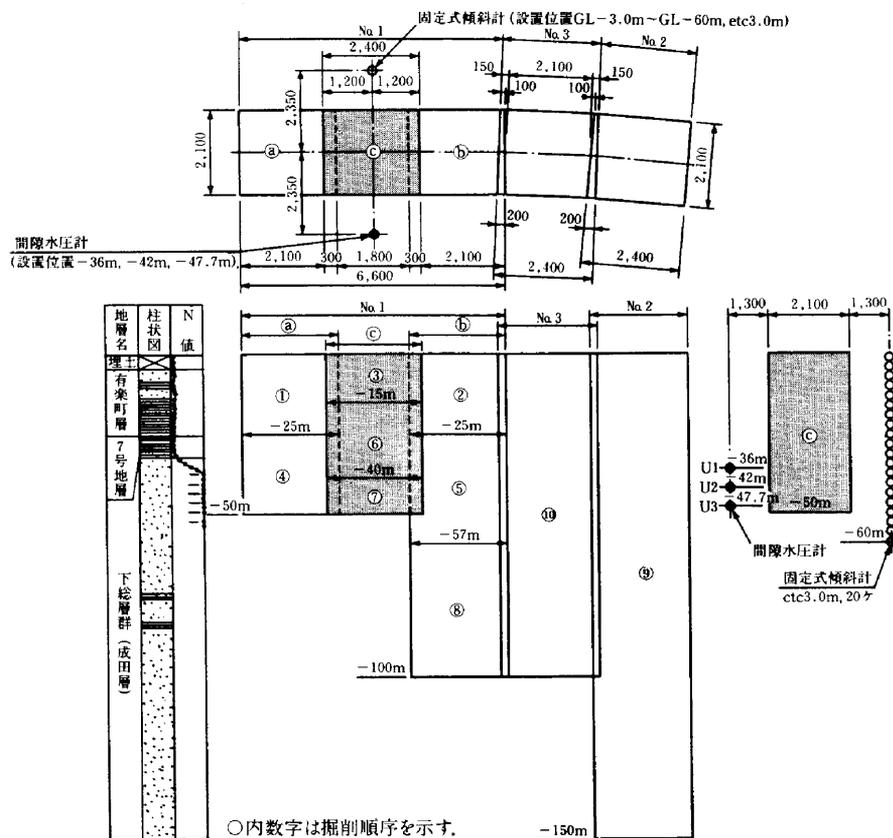
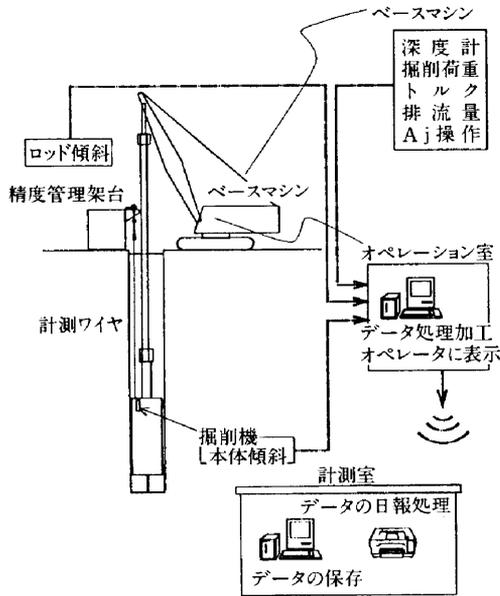
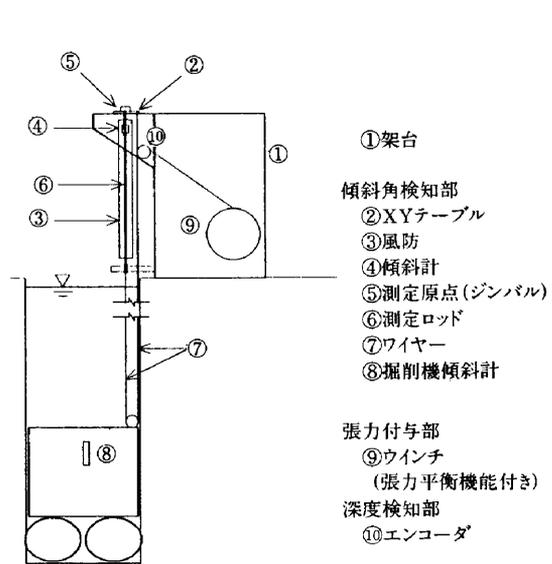


図-1 実験工事概要図



図一 2 西松式掘削精度管理システム



図一 3 掘削精度管理架台

レータにフィードバックし、掘削精度の管理に供するものである（図一 2 参照）。

本システムで中心的機能を持つ精度管理架台を図一 3 に示す。本装置は、ワイヤーの傾斜測定、深度測定、張力付与の機能を持っている。ワイヤー傾斜測定部は、測定原点（ジンバル機構；回転自由）、ロッド、ワイヤーからなる。ワイヤー傾斜は直接測るのではなく、長さ約 2m のロッドを介してワイヤーの傾斜を測定する。

深度測定はロータリエンコーダ、張力付与は張力平衡機能付ウインチによっている。

掘削機位置検知は、掘削溝の上部に架台を設置し、これと掘削機頭部との間にワイヤーを一定張力で張り、ワイヤーの長さおよび傾斜角、掘削機の傾斜角を測定し、掘削機刃先の変位量を算出する方法である（図一 4 参照）。

3-2 装置の開発

(1) 目標精度

測定の目標精度は、掘削精度目標  $\delta_{max}$  を 7.5 cm 以下とし、この精度を確保するために、150m の地下で掘削機の変位 1cm を検知可能な装置開発をめざした。この目標精度を傾斜角に換算すると角度 14 秒の微小角度である。

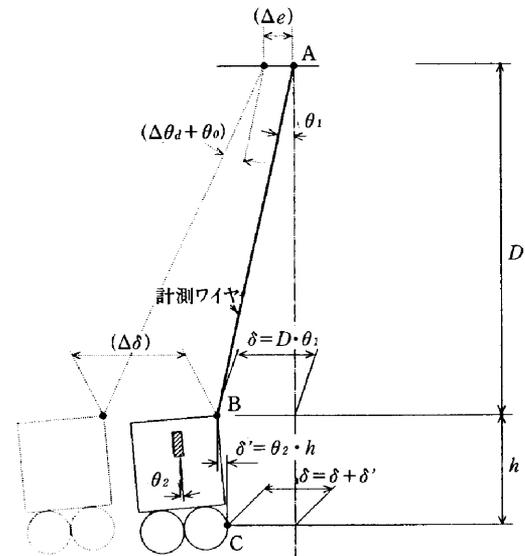
(2) 高精度化のための検討

検知精度は、図一 4 の「A 点の位置の精度」と「ワイヤー角度の測定精度」に依存する。

次式でおよその誤差  $\Delta \delta$  を推定できる。

$$\Delta \delta = \Delta e + (\Delta \theta_0 + \Delta \theta_1) \cdot D$$

- ここに  $\Delta e$  : A 点の位置誤差
- $\Delta \theta_0$  : ワイヤー傾斜角測定誤差
- $\Delta \theta_1$  : 鉛直初期値誤差
- D : 掘削深度



注) 点線および ( ) 記号は誤差に関する

図一 4 位置検知概念

$\Delta e$  については、測量で  $\Delta e \leq \pm 2\text{mm}$  程度の位置決めは容易であるし、深くなってもその影響は増幅されない。一方、角度誤差  $\Delta \theta_0$  および  $\Delta \theta_1$  については、深さに比例してその影響は増す。大深度を対象にする時は、角度測定精度と鉛直初期値精度が重要になる。以上を念頭において、高精度化のために次のような工夫を凝らした。

① 高精度の傾斜計の使用

分解能・再現性が約 0.2 秒の高精度の傾斜計を使用した。

② 複数回の測定値の平均化

安定液流や機械振動によるワイヤーの揺れ・振動を平滑化するため、数百回/秒（測定間隔）×数秒（測定時間）の平均値を求めた。

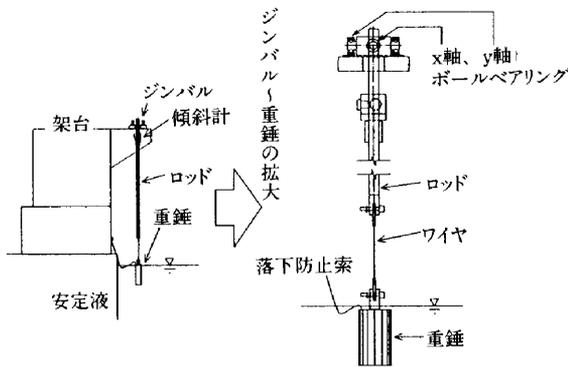


図-5 重錘による鉛直初期値決め方法

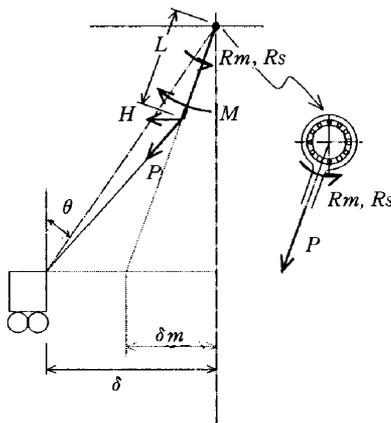


図-6 ジンプアルの回転抵抗

③重錘による鉛直初期値決め

鉛直初期値の設定には、トランシット視準方法と重錘懸垂方法の2つの方法が考えられる。トランシットは鉛直性の保証がない上、視準可能なワイヤー長が短く誤差が大きいため、今回は図-5に示すように重さ約100kgf(981kN)の重錘を用いて行った。

④測定ワイヤー上端部へのロッドの設置

ロッドの併用により、次のような利点がある。

- ・ 当社の独自性がある。
- ・ 測定精度向上の効果が大きい。

ジンプアル（x, y軸にボールベアリングを装備）の回転抵抗を考慮した位置検知推定値  $\delta_m$  を、次の様に試算した（図-6参照）。

$$\delta_m = \delta (M - R_m) / M$$

ただし、 $M < R_s$  の時は  $\delta_m = 0$  とする。

ここに

$\delta$  : 掘削機変位量

$M$  : ロッドの回転力,  $M = P \cdot \theta \cdot L$

$R_m$  : 抵抗トルク,  $R_m = P \cdot k_1 \cdot r$

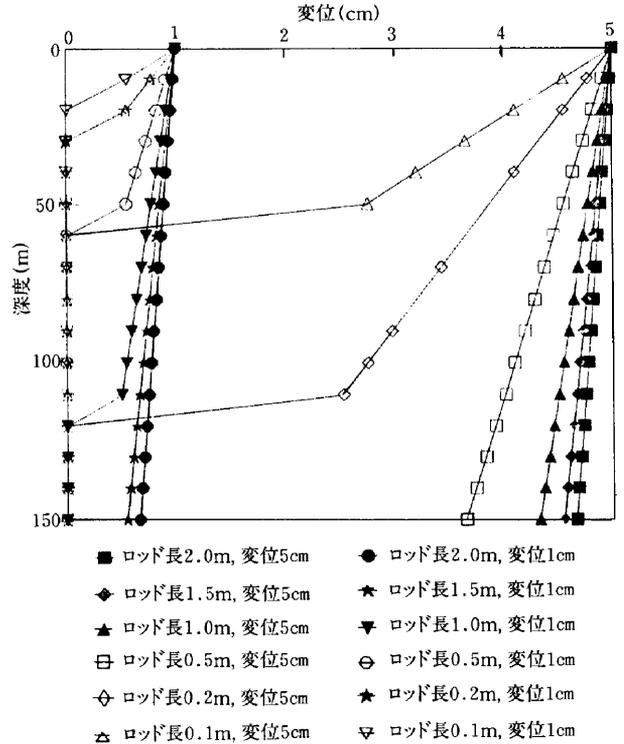


図-7 ジンプアルの回転抵抗に関する影響度試験

$R_s$  : 初動抵抗トルク,  $R_s = P \cdot k_2 \cdot r$

$P$  : ワイヤー張力 100kgf(981kN)

$\theta$  : ワイヤーの傾斜角(rad)

$L$  : ロッドの長さ(cm)

$k_1$  : 抵抗トルク係数=0.0025

$k_2$  : 初動抵抗トルク係数 ( $k_1$ の2倍)

$r$  : ベアリングの回転半径(=1cm)

上式で掘削機変位量が  $\delta=1$ cm および  $\delta=5$ cm の時の位置検知推定値  $\delta_m$  を試算し図-7に示した。図-7より、ロッド長が大きいほど回転抵抗の影響は小さく、 $\delta_m$  の精度は高いことが確認される。また、深度が深くなると、回転モーメント  $M$  がジンプアルの初動抵抗トルク  $R_s$  よりも小さくなり、ロッド傾斜が発生しないことになる。これは孔曲りが発生しているにもかかわらず真直に掘削を行っているという間違った情報を提供することになり、最も危険な状態である。図-7はある仮定の下での試算に過ぎないが、ボールベアリングの圧痕などで初動抵抗が増加した時にはこのような状況が実際に発生する危険性が大きい。この傾向は変位が小さい時ほど著しい（図-7で  $\delta=1$ cm の時の方が精度が劣る）。

その他に、ワイヤーのたるみ、ロッドの重さの影響度を検討し、ワイヤー張力100kgf(981kN)でロッドの重さが約2kgf(19.6kN)の時に両者の影響度は5%以下であることを試算で確認した。内容は、紙面の都合で割愛する。

(3) 装置の製作

前項の検討結果を基に図-8、表-1に示す装置を製作した。

3-3 性能確認実験

(1) 実験内容

測定精度の確認に重点をおいて次の実験を実施した。

- ①鉛直初期値決めに関する実験
- ②掘削中断時の強制変位試験
- ③掘削中の掘削機位置検知

①は、初期値の影響要因を調査したものである。初期値決め用の重錘の重量、ワイヤー端子などの影響度を調査した。

②は、深度50m、100m、150mで掘削機の計測ワイヤー用シーブに50mmの水平変位を与えて、測定精度確認のために実施した（図-8参照）。

③は、掘削機の切削反動などのある条件下での測定能力の確認のために実施した。

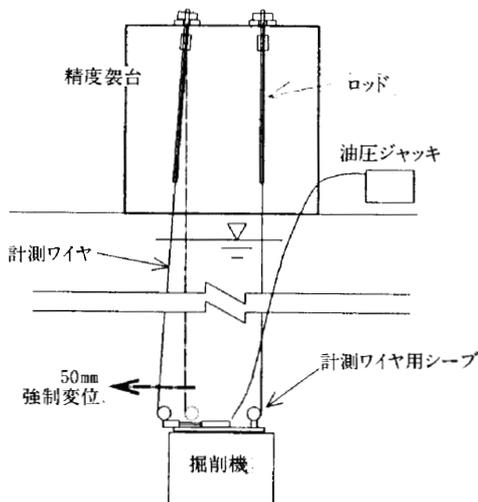


図-8 強制変位試験要領

表-1 掘削精度測定装置の概要

重量	約3tf	
寸法	幅長高 2.8m×2.5m×3m	
測点	2点	
ワイヤ傾斜測点	傾斜計	2方向×2測点=4点
深度測点	ロータリーエンコーダ	1基
位置決め	XYテーブル	2組
鉛直決め	重錘	2組
張力付与	ウインチ	10~20kgf・m 2基 (98.1~196.2kN・m)

(2) 実験結果

測定結果を図-9、図-10および図-11に示す。

図-9は、重錘重さを変化させた時の初期値の変動である。初期値は重さへの依存度が大きい。原因としては、重さによるロッドとワイヤー端子の変形（両者とも真直でない）が考えられる。また、ワイヤー端子の反転やボールベアリングの交換で数10秒の変動があることを確認している。この結果から、①ロッドとワイヤー端子は可能な限り真直に製作すること、②ワイヤーの張力に相当する重錘を用いること、③張力の変動は可能な限り小さくすること等の対策が必要と言える。

図-10は、深度150m、張力100kgf(981kN)の時の強制変位試験結果である。縦軸は変位量、横軸は時間を示している。強制変位量50mmに対して、測定値は約48±2mmで、変位を高精度に検知している。泥水循環によっ

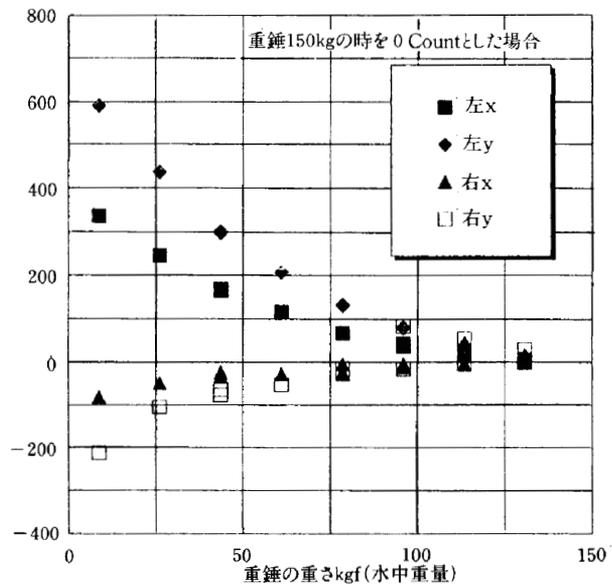


図-9 重錘重さと鉛直初期値の関係

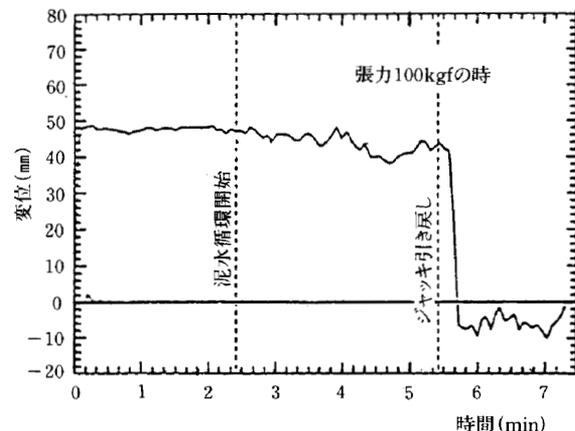


図-10 強制変位試験（深度100mで強制変位量5cmの時）

### § 4.掘削能率の分析

壁厚2.1m, 深度150m級の大深度・厚壁地中連続壁の掘削能率に関する情報はほとんど皆無であるのが現状である。

本実験工事では, 地山掘削(全断面掘削とラップ掘削)およびコンクリートカッティングの3種類の掘削に関する情報を収集して計測結果を整理した。

ビット回転式掘削機の純掘削速度は, 一般に次の3つの能力により決定される。

- ①掘削(切削)能力
- ②揚泥ポンプ能力
- ③掘削ずりの土砂分離設備能力

今回の実験工事では, ②, ③に関する能力は確保されているものと考え, ①のみに焦点をしばって3種類の掘削に関する掘削作業能率についての考察を行った。

#### 4-1 全断面掘削に関する掘削能率

一般によく使用されている回転式のリバースサーキュレーション掘削機の純掘削速度は, 回転数(R) およびビット荷重(W) に比例的な関係にあり, ガット面積(掘削機で1度に掘削できる面積, 本実験工事では2.1m×2.4m)および地盤強度に反比例的な関係にあることが知られている。今回の実験工事では, 純掘削速度(V)に関する計測結果を上記の実績に基づき, 掘削機1ガット面積(A)当りの地盤のせん断力 ( $S=A \cdot \tau$ ,  $\tau$ :地盤のせん断強度) に対するビット荷重の比率(W/S) とドラム1回転数当りの掘削速度(V/R) (ドラム1回転当りの掘削土量) との関係を求める。No.2エレメントの掘削記録からW/S ~ V/Rの関係を図-12に記す。さらに, この時のW/S ~ V/Rの関係は次のとおりである。

$$\text{粘性土: } \frac{V}{R} = 0.298 \frac{W}{S} + 0.877 \times 10^{-2} \pm \sigma \quad (\sigma = 0.01145)$$

$$n=14, r=0.627$$

$$\text{砂質土: } \frac{V}{R} = 0.211 \frac{W}{S} + 2.04 \times 10^{-2} \pm \sigma \quad (\sigma = 0.00368)$$

$$n=73, r=0.220$$

$$\text{全 体: } \frac{V}{R} = 0.128 \frac{W}{S} + 2.03 \times 10^{-2} \pm \sigma \quad (\sigma = 0.00591)$$

$$n=87, r=0.468$$

ここで V : 掘削速度(m<sup>3</sup>/hr)

W : ビット荷重(tf)

S : 1ガット当りの合計地盤のせん断力  $S = A \cdot \tau$  (tf)

R : 1時間当りの回転数, 本計測では744(rev/hr)

$\sigma$  : V/R軸まわりの標準偏差(m<sup>3</sup>/rev)

n : 計測データ数

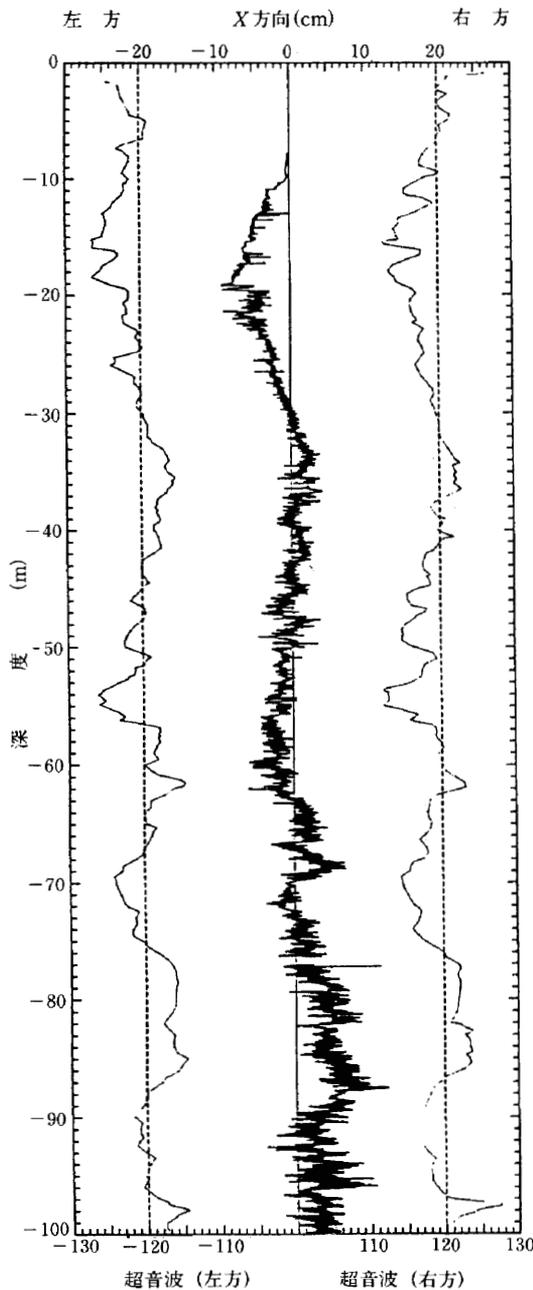


図-11 変位測定結果 (No.3エレメント)

て振幅が大きくなるが, 平均値はほとんど変化しない。

図-11は, No.3エレメントの掘削機の変位実測値(左右)である。超音波による結果も併記してあるが, 両者の値はよく一致している。No.3エレメントはコンクリートカッティング掘削で, 切削反動が大きく, 測定が難しいとされているが, 上記の結果を得たことで, 精度的にも十分実用に供し得ると判断した。

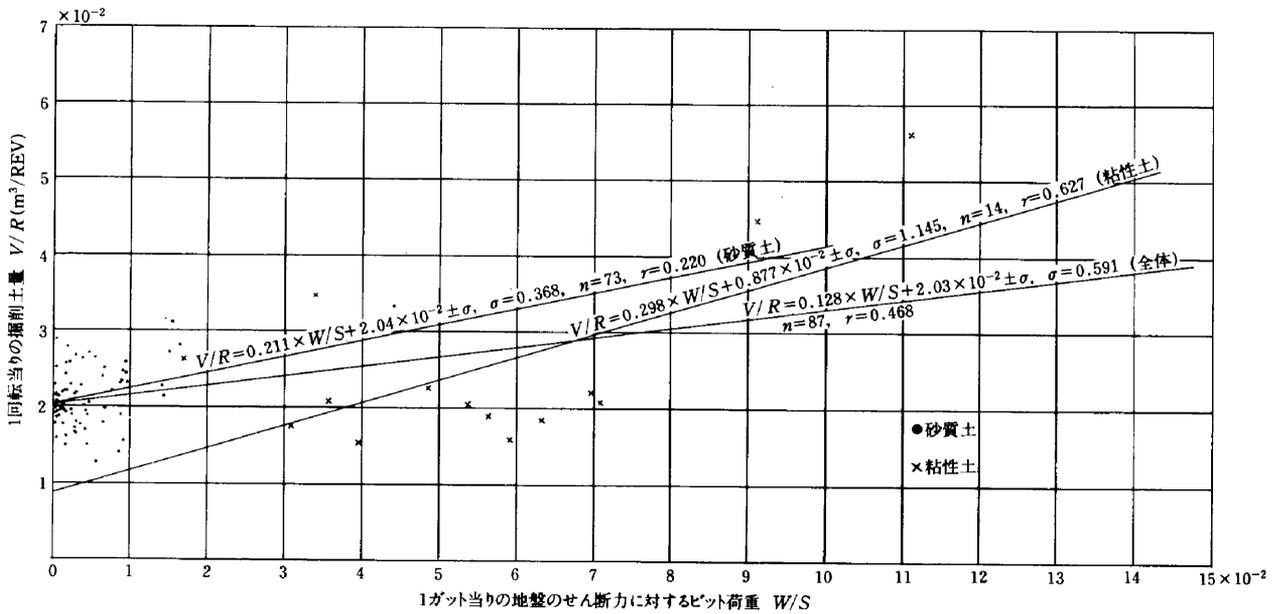


図-12 W/RとV/Rとの関係（全断面掘削）

r : 相関係数

図-12から分かるように、粘性土の掘削速度は、ビット荷重が大きくなれば明らかに大きく変化する一方、砂質土の掘削速度はビット荷重にはほとんど影響を受けていない。

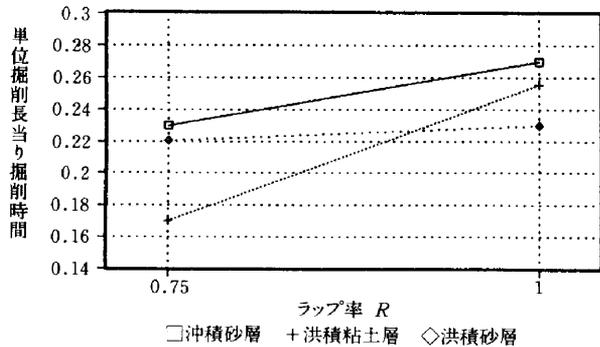


図-13 ラップ掘削率と土質層掘削時間の関係

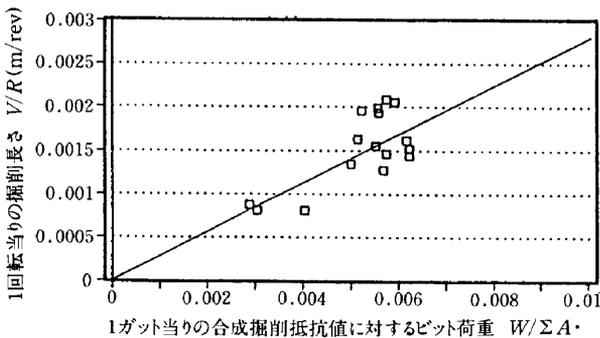


図-14 W/ΣA・τとV/Rとの関係

#### 4-2 ラップ掘削に関する掘削能率

地中連続壁のラップ掘削（中間ガット部の掘削）の程度を表す指標として、全面掘削時の掘削面積A<sub>F</sub>に対するラップ掘削時の掘削面積A<sub>L</sub>の比R（本掘削ではR=0.75）をラップ掘削率と称し、ラップ掘削率による掘削速度の違いを土質層別に比較したものを図-13に示す。

図-13から分かるように、全断面掘削よりもラップ掘削の方が掘削時間は小さい。さらに、洪積粘土層以外ではその減少も小さい。

#### 4-3 コンクリートカッティングに関する掘削能率

4-1と同様に、（掘削荷重／せん断抵抗）と掘削速度の関係を求めた。せん断抵抗は地山または改良地盤とコンクリート部の合成抵抗（ΣA・τ）を用いた。実験結果から次のようなV/RとΣA・τの相関関係が得られた。

$$\frac{V}{R} = 0.30 \frac{W}{\Sigma A \cdot \tau} \pm \sigma \quad (\sigma = 0.00031)$$

$$n = 16, r = 0.718$$

- ここで、
- V : 掘削速度(m³/hr)
  - W : ビット荷重(tf)
  - ΣA・τ : 合成掘削抵抗値(tf)
  - R : 1時間当たりの回転数(rev/hr),  
本計測では744(rev/hr)を用いた。
  - σ : V/R軸まわりの標準偏差(rev/hr)
  - n : 計測データ数
  - r : 相関係数

以上の結果から合成掘削抵抗値当たりのビット荷重は、ドラム回転数当たりの掘削速度と良い相関関係にあ

ることが分かった（相関係数 $r=0.718$ ）。

#### 4-4 掘削能率のまとめ

本実験工事において、掘削能率について、次のような結論を得た。

- ①掘削速度とビット荷重の関係には4-1で述べた様な直線回帰式と相関係数 $r$ を得た。これらの結果から、砂質土の掘削速度は $W/S$ にほとんど影響を受けないこと粘性土の掘削速度は $W/S$ に正比例して大きく変化することが分かった。
- ②全面掘削とラップ掘削の掘削速度を比較すると、ラップ掘削の方が全面掘削より大きい。
- ③コンクリートカッティング時の掘削能率には、コンクリート強度、カッティング面積およびビット荷重が多大な影響を及ぼす。

## § 5. おわりに

掘削精度管理システムの開発と掘削能率に関する分析結

果の概略を報告した。

前者については、深度150mという大深度で、当初の目標を満足する精度で掘削機の位置検知に成功した。さらに、本報では紙面の都合上割愛した多くのノウハウを蓄積することができた。実験終了後、これらの成果をもとに、実工事現場での使用を考慮した装置の製作に着手し、間もなく完成の予定である。使い勝手の向上や施工管理に生きた情報を与えるために、実験に費やした以上に、よりきめ細かな配慮や多くの労力を費やした。幸い近々実工事に採用する予定である。その結果についても機会があれば紹介したいと考えている。

後者については、有意義なデータ収集・分析を得たが、一実験のデータだけでは把握できないような要因を多く含んでいる。今後、多くの実績から更に精度の高い分析を実施したい。

最後に本実験にあたって、ご指導ご協力を頂いた関係各位に、この紙面を借りて謝意を表する。