

DIA-WIN 工法による地下連続壁施工時の計測と解析

Monitoring and Analysis of Ground Behavior and Excavation Efficiency in Diaphragm Wall Construction (DIA-WIN Method)

| | |
|---------------------|------------------|
| 細井 武* | 小堀田 勉** |
| Takeshi Hosoi | Tsutomu Koborida |
| 土井 幸夫*** | 長野 敏郎**** |
| Sachio Doi | Toshio Nagano |
| 笠松 照親***** | 石田 忠***** |
| Teruchika Kasamatsu | Tadashi Ishida |

要 約

当社独身寮ルーミィ神崎川（仮称）の地下部に採用した西松式地下連続壁工法（DIA-WIN 工法，油圧式バケット使用）による連壁工事施工時に，周辺地盤の挙動や掘削能率に関する計測を実施し，解析した。掘削時に周辺地盤に発生する間隙水圧の変動は 1～2 tf/m²（10～20kPa）に達する場合があります，安定解析時に考慮すべきであることが判明した。

掘削能率の計測は，タイムラプスビデオを用いて行ったが，単純・反復作業のサイクルタイムを測定するのに有効であった。また，掘削能率を構成している各種作業時間を分析することができたが，今後実績収集が必要である。

目 次

- §1. はじめに
- §2. 工事概要
- §3. 周辺地盤の挙動に関する計測
- §4. 掘削能率に関する計測
- §5. おわりに

§1. はじめに

現在，大阪市淀川区加島において建設中の当社独身寮ルーミィ神崎川（仮称）（RC 造，地下1階，地上7階，寮室96室）の地下部に西松式地下連続壁工法（DIA-WIN 工法）による地下連続壁が採用された。DIA-WIN

工法の開発にあたり，今まで壁体に関する構造力学上の試験は数多く実施されてきたが，今回は主として掘削時の周辺地盤の挙動や掘削能率に関する基礎資料を得るために，以下の計測を実施した。

- ① 掘削中の周辺地盤の間隙水圧の変動・振動・変位等の挙動計測
- ② 特殊ビデオを使用した掘削能率に関する計測

本報文は，これらの計測の結果およびその解析について報告するものである。

§2. 工事概要

2-1 建物概要

本建物は地下1階，地上7階の RC 造であり，地上部の平面形状は 12.5m×48.65m，地下部は 12.5m×24.0m である。

地下部は外周に DIA-WIN 工法による地下連続壁が配置され，施工時には山留め壁として機能し，完成後は地下外壁および耐震壁，さらに基礎杭として機能する。

*土木設計部副部長
**関西(支)ルーミィ神崎川(作)主任
***関西(支)建築部課長
****関西(支)北勢田(出)所長
*****技術研究所原子力課長
*****建築設計部課長

2-2 土質概要

当該地点の地層構成は、Fig. 1 に示すように GL-6 m~GL-7 mまでの沖積砂質土層 (N 値 1~25のゆるい細砂~中砂を主体、所々シルトや礫を含む)、その下部の GL-15m 付近までの沖積粘性土層 (N 値 0~4 の非常に軟弱な貝殻片を含む均質な粘土、下部の方は細中砂を含む所がある) および上部洪積層より成っている。上部洪積層のうち GL-15m~GL-22m 付近の砂礫層は天満砂礫層と呼ばれ、当該地下連続壁基礎の支持層になっている。

2-3 DIA-WIN 工法による地下連続壁工事

DIA-WIN 工法による連壁工事の規模を Table 1 に示す。

連壁の掘削には油圧バケット MHL-60100AY (バケット幅600mm, バケット長2700mm) を使用した。また、連壁のエレメント割りを Fig. 2 に示す。

§ 3. 周辺地盤の挙動に関する計測

3-1 計測目的・内容

DIA-WIN 工法による地下連続壁施工時における掘削周辺地盤内の変位、間隙水圧の変動、振動等を計測し、掘削時の溝壁の安定問題や、施工法決定時の基本資料とするため、Table 2 に示す計測を実施した。なお、加速度計による地盤振動の計測は、間隙水圧の変動と地盤振動の関係を把握することを目的としている。

計測器設置位置の平面図を Fig. 3 に示す。また、計測システムとしてパーソナルコンピューターと電磁オシログラムを用いて、計測データを自動記録するシステムを採用した。

3-2 計測結果と考察

(1) 加速度と間隙水圧の変動の関係

安定液中におけるバケットによる掘削作業のサイクルは一般に次のとおりである。

- ① バケットが安定液中に「着水」し「降下」する。
- ② バケットが掘削深度に「着底」後、バケットの刃先を土中にくいこませ、バケット内に土を積込むために「チョッピング」をする。
- ③ バケット内に掘削土の積込みを完了した後、バケットは安定液中を「上昇」し、安定液中から「離脱」する。

掘削中に周辺地盤に発生する加速度と間隙水圧の変動を、上記の①→②→③を通して計測した。

Fig. 4 および Fig. 5 は、上記①→②→③中に発生した加速度と間隙水圧の変動値を示している。Fig. 4 は、

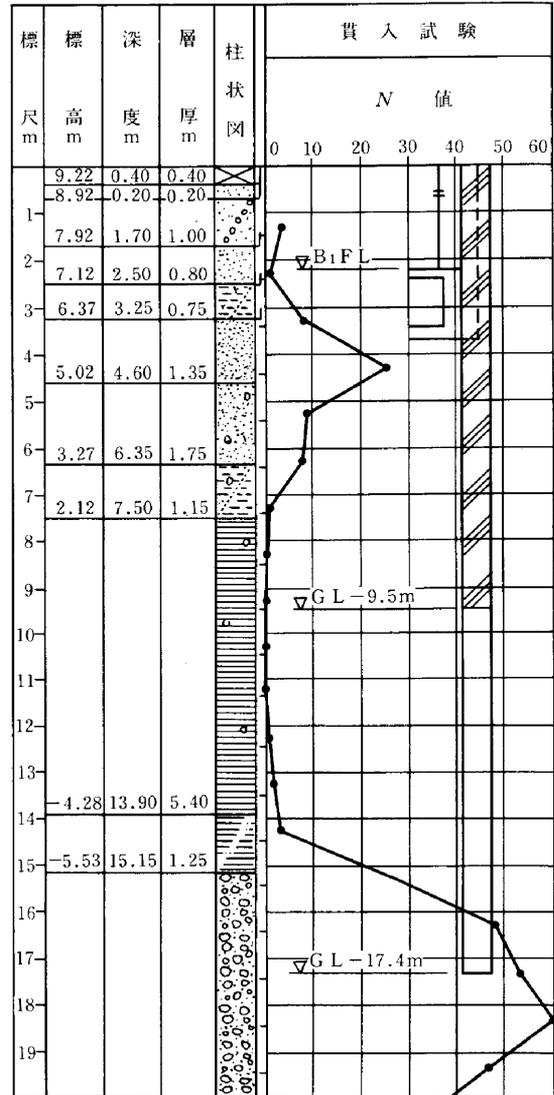


Fig.1 土質柱状図

Table 1 DIA-WIN 工法による連壁工事規模

| 項目 | 工事規模 |
|---------|--|
| 壁厚 | 600 mm |
| 深度 | 先行エレメント GL-9.5m 後行エレメント GL-9.5m および GL-17.4m (Fig. 2 の) |
| 掘削面積 | 1151.6 m ² |
| コンクリート量 | 702.9 m ³ |
| 残土量 | 760.1 m ³ |
| 鉄筋量 | 61.6 t |
| 付帯鋼材 | 31.6 t |
| エレメント数 | 24 |

沖積層中の GL-5.0m に設置されている加速度計 (A-1) および間隙水圧計 (u₁-1, u₀-1) の計測値で

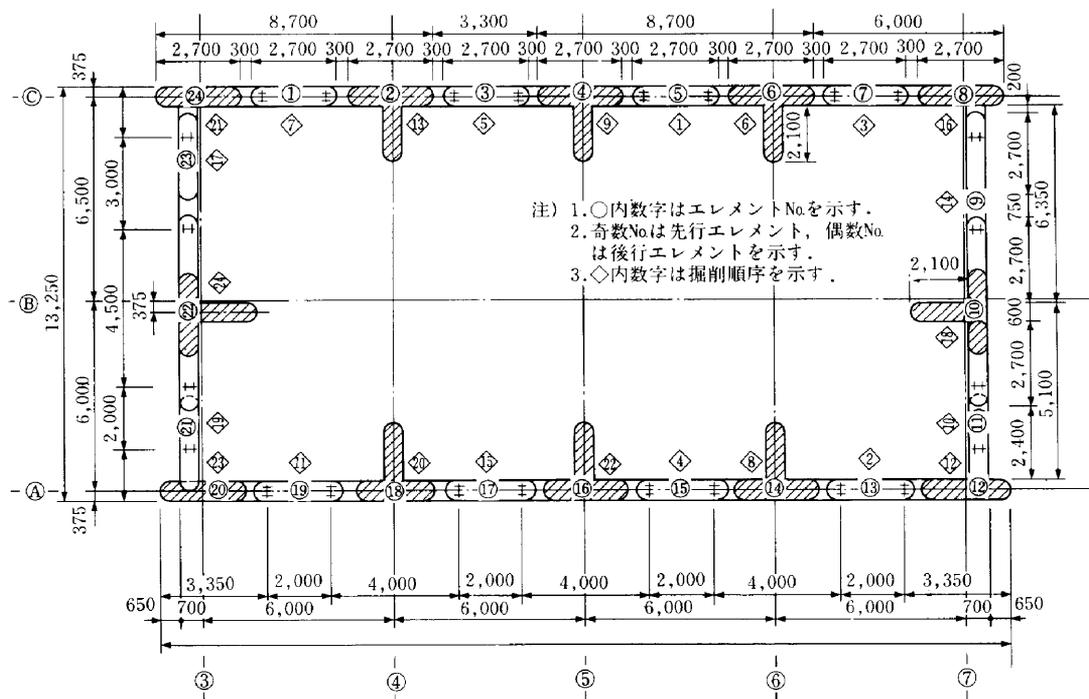


Fig. 2 エレメント割り図

Table 2 計測の種類

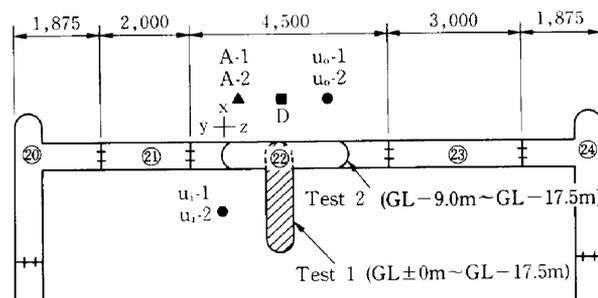
| Test No. | 計測の種類 | 掘削深度 |
|------------------------|-----------------------------|---------------------|
| Test 1 (No.22エレメント) | 掘削時の間隙水圧・振動・水平変位 | GL±0 ~ GL-9.5m |
| | バケットの落下による間隙水圧・振動 (落下試験) | GL-13.0mおよびGL-16.0m |
| Test 2 (No.22エレメント) | 掘削時の間隙水圧・振動・水平変位 | GL-9.5m ~ GL-17.4m |
| | バケットの落下による間隙水圧・振動 (落下試験) | GL-13.0mおよびGL-16.0m |

ある。また、Fig. 5 は洪積層の GL-16.0m に設置されている加速度計(A-2)および間隙水圧(u_i-2 , u_o-2)の計測値である。

Fig. 4 および Fig. 5 から、洪積層中の方が両者の相関があるものと推定できる。加速度と間隙水圧の変動の関係をより明らかにするため、前述のサイクル①+③(バケット昇降時)とサイクル②(着底、チョッピング時)において発生している加速度と間隙水圧の変動(A-1 および u_o-1 を対象)の関係を別々にプロットしたものが、Fig. 6 および Fig. 7 である。

Fig. 6 より明らかなように、バケット昇降時に発生している間隙水圧の変動は、加速度に関係なくほぼ一定であり、平均0.054tf/m² (0.53kPa) 程度である。

バケット昇降時に発生する加速度の発生要因について断定はできないが、地上の重機の振動、安定液中のバケット昇降時のバケットの溝壁への接触、バケットや安定液の上下動等が考えられる。しかしながら、発生する間隙水圧の変動は小さく溝壁の安定にはほとんど問題にな



注) 設置レベル

- 間隙水圧計 (U) u_o-1 , u_i-1 : GL-5.0m, u_o-2 , u_i-2 : GL-16.0m
- 傾斜計 (D) GL-1.0m, -4.0m, -7.0m, -10.0m, -13.0m, -16.0m, -18.5m
- ▲ 加速度計 (A) A-1: GL-5.0m, A-2: GL-16.0m

Fig.3 計測器設置位置平面図

らない。

Fig. 7 は沖積層中の A-1, u_o-1 についてバケット「着底」時および「チョッピング」時の加速度 A と、間隙水圧の変動 Δu の関係を示す。

t 分布表より、両者の相関関係を否定する確率は30%程度になり、相関があるともないとも断定できない。

同様に洪積層中の A-2, u_o-2 についてバケットの「着底」および「チョッピング」時の A と Δu の関係を Fig. 8 に示す。両者の相関関係を否定する確率を求めると0.1%以下であり極めて有意な相関があると言える。

(2) 間隙水圧と閉塞効果

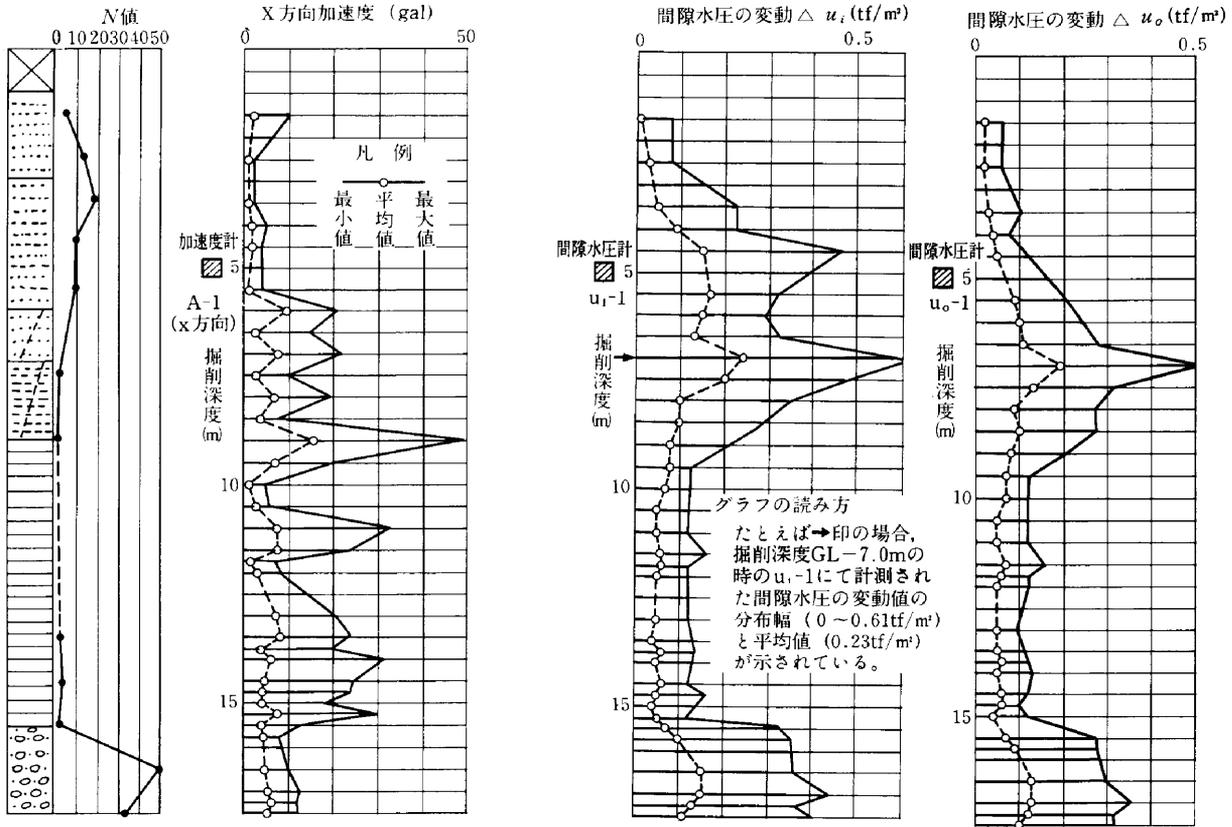


Fig.4 Test-1掘削深度と加速度・間隙水圧の変動の関係(A-1, u_i-1 , u_o-1)

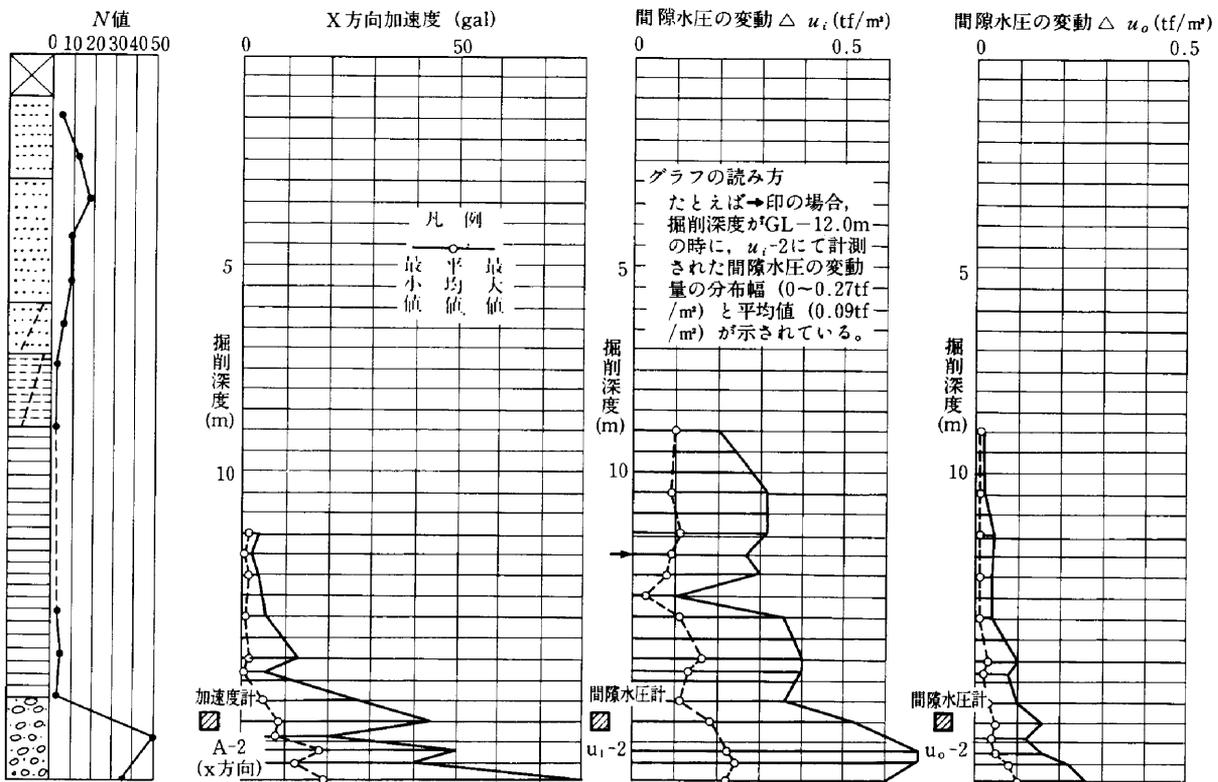


Fig.5 Test-2掘削深度と加速度・間隙水圧の変動の関係(A-2, u_i-2 , u_o-2)

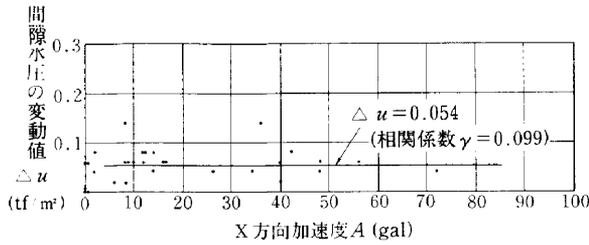


Fig.6 発生加速度と間隙水圧の変動の関係
(バケット昇降時、GL-5.00m設置の u_0-1 とA-1の読みに基づく.)

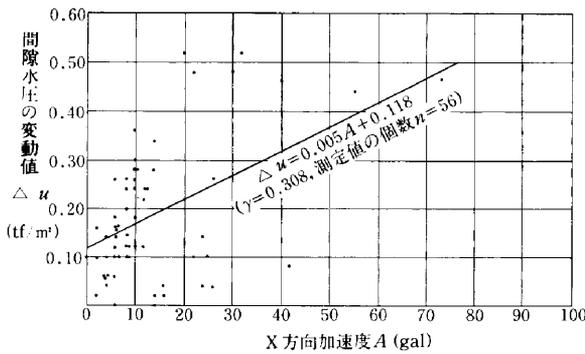


Fig.7 発生加速度と間隙水圧の変動の関係
(チョッピング時、GL-5.00m設置の u_0-1 とA-1の読みに基づく.)

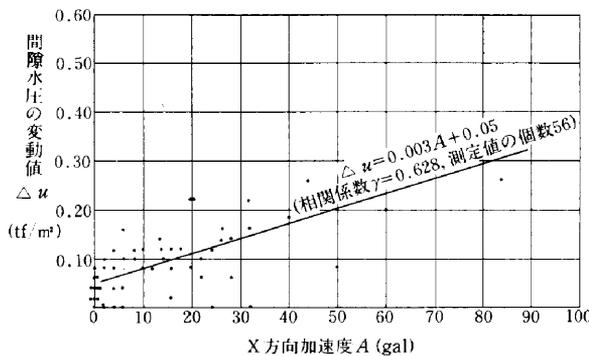


Fig.8 発生加速度と間隙水圧の変動の関係
(チョッピング時、GL-16.0m設置の u_0-2 とA-2の読みに基づく.)

掘削中に周囲地盤の間隙水圧が変動する原因として次のような要因が考えられる。

- ① バケットによる掘削時 (着底およびチョッピング時) の地山の振動・動き
- ② バケットの安定液中の上下動あるいは安定液の上下動

Fig.6より②による間隙水圧の変動は、小さいことが判明しているため、ここでは①の要因に基づく間隙水圧の変動と、周囲を地下連続壁等で閉塞された場合の閉塞

効果の関係を考察する。

Fig.4において、地下連続壁で囲まれた内側の間隙水圧の変動 Δu_i と外側の間隙水圧の変動 Δu_o を比較すると、 Δu_i の方が若干大きいことが判る。

また、Fig.5においても $\Delta u_i > \Delta u_o$ であることが明らかである。

Fig.9は落下試験の結果を示す。Fig.9より Δu_i は

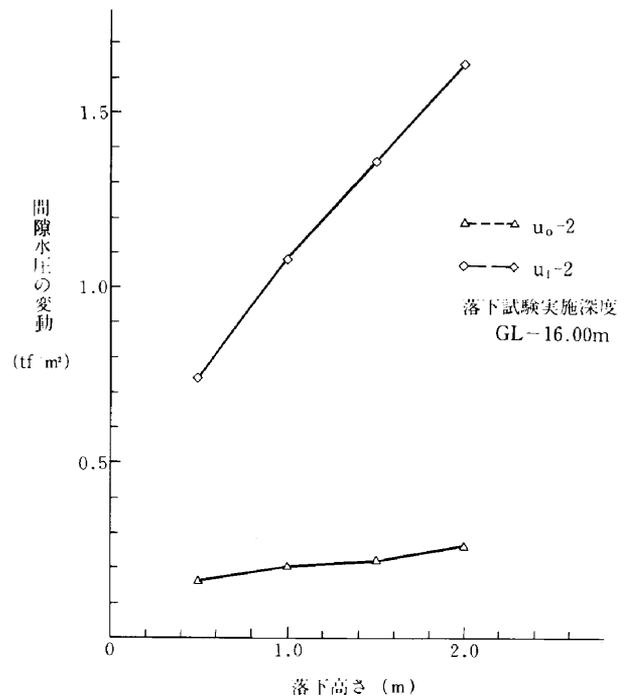


Fig.9 落下試験による間隙水圧の変動

Δu_o に比べてはるかに大であることが判る。

これらの間隙水圧の変動値の差異は、上記①の要因に基づく間隙水圧の変動が、周囲の地下連続壁により閉塞されていることにより、増幅されるものと判断される。阪神高速湾岸魚崎浜工区において実施された計測^{1),2),3)}においても、同様な現象が観測されている。

この閉塞効果は、小断面の地中連続壁基礎の施工時に、溝壁の安定に大きな影響を与えることが予想され、計画時にこれらの間隙水圧の変動を考慮した溝壁の安定解析が必要である。

§4. 掘削能率に関する計測

4-1 計測目的・内容

地下連続壁施工時の掘削能率に関して今までの実績に基づき種々の基準値が提案されている。しかし、その基準値は提案者により大きく異なり、その値の採用根拠があいまいであるのが現状である。本計測は、上記のあい

まいさを少しでも打開するため、掘削作業のサイクルタイムを計測し、掘削能率の構成要素を把握することを目的としている。

油圧式バケットによる地下連続壁工事の主作業は、以下の9作業に分類できるが、本計測は②「掘削」に関するサイクルタイムに限定した。

- ① 掘削準備, ② 「掘削」, ③ バケットによる底ざらえ, ④ 溝壁測定, ⑤ スライム処理 (1次, 2次), ⑥ 鉄筋籠建込み, ⑦ ジョイント工, ⑧ コンクリート打設, ⑨ 休止他。

4-2 サイクルタイムの計測手法

サイクルタイムの計測は、特殊ビデオを用いて行った。特殊ビデオとしてタイムラプスビデオ (AG-6011VTR, 松下電氣(株)製) を採用した。本ビデオは、コマ送り速度を変化させることが可能であり、本計測には通常のビデオの1/36のコマ送り速度の間欠録画を行った。また、本ビデオには年・月・日・時・分・秒を重畳記録させるタイムデートジェネレータが内蔵されている。使用したビデオ計測システムの概要を Fig. 10 に示す。

収録したビデオを再生し、画面に表示されているタイム記録より当工事の作業内容に関するサイクルタイムを正確に読み取ることが可能であった。読み取った掘削に関するデータを電子計算機に入力し、統計的な整理・解析を行った。

4-3 計測結果

油圧バケットによる掘削作業時間を Table 3 に示す作業時間に分類し、計測結果を整理した。また、バケットの昇降サイクル数と掘削長に関する計測結果を Table 4 に示す。

4-4 掘削能率に関する考察

(1) 1サイクル当りのバケットによる掘削量 V_E

1サイクル当りのバケットによる掘削量 V_E は、バケット容量 V_B 、バケットの刃先に使用する荷重、刃先形状、掘削速度、土質等に影響を受ける。 V_E と V_B の比 μ はバケット内への掘削土の積込み率を表わし、次式によって定義される。

$$\mu = \frac{V_E}{V_B} = \frac{(1 + \alpha) \cdot \beta \cdot a \cdot b \cdot L}{V_B N}$$

ここに、 α : 溝壁の余掘率

β : 地山に対する土量変化率、一般土工の土量変化率とは値を異にする。

a : バケット長, b : バケット幅

計測結果に基づき沖積砂質土に対する μ を算定する。

$a = 2.5\text{m}$ (平均) $b = 0.6\text{m}$

$1 + \alpha = 1.04$ (溝壁測定結果より1.04を採用)

$\beta = 1.1$ (採用⁴⁾)

$V_B = 0.75\text{m}^3$

$L/N = 0.407$ (Table 4 から)

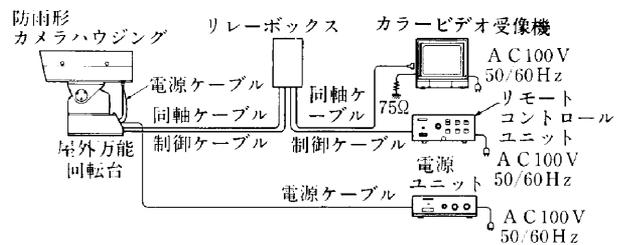


Fig.10 タイムラプスビデオによる計測システム

Table 3 「掘削」作業時間の計測結果

| 「掘削」作業時間の分類 | | 作業時間 (s) | 標準偏差 (s) | 相関係数 | 計測回数 | 備考 |
|---------------------------------------|-------|------------|----------|-------|------|---|
| バケットの安定液中の昇降時間 (t_D) | | 3.52 h^* | 16.5 | 0.940 | 164 | $t_U = 16\text{m}/\text{min}$, $t_D = 17\text{m}/\text{min}$ は使用クレーン (LS-118RH) の主フック巻上・巻下速度 $25\text{m}/\text{min}$ の60~70%に相当する。 |
| バケットの安定液中の上昇時間 (t_U) | | 3.71 h^* | 17.1 | 0.928 | 164 | |
| 純掘削時間 (t_E) | 沖積砂質土 | 152.0 | 966.9 | 0.980 | 396 | |
| | 中性粘性土 | 121.4 | 801.0 | 0.940 | 396 | |
| 地上におけるバケット内の水の排水時間 (t_W) | | 8.41 | 2.68 | | 396 | $t_G = t_W + t_{Of} + t_{Ob} + t_F$ = 71.4 (s) $\sigma_G = \sigma_W + \sigma_{Of} + \sigma_{Ob} + \sigma_F$ = 13.6 (s) |
| 掘削位置から放土位置までのバケットの旋回時間 (t_{Of})** | | 12.7 | 2.69 | | 399 | |
| 放土位置から掘削位置までのバケットの旋回時間 (t_{Ob})** | | 14.2 | 2.31 | | 399 | |
| バケットからの掘削土の放土時間 (t_F) | | 36.1 | 6.00 | | 398 | |
| 掘削作業中の休止他時間 (t_S)*** | | 201.6 | 120.1 | | 299 | |

註) * h : 掘削深度

** 旋回時間と旋回角度の相関は低く、 t_{Of} , t_{Ob} に関する相関係数はそれぞれ $\gamma_{Of} = -0.060$, $\gamma_{Ob} = 0.20$ である。

従って、計測結果を旋回角度に関係なく整理した。

*** 「掘削」作業中に所定の掘削精度を確保するための調整ジャッキの操作時間や修正握りの時間等が当作業時間に含まれる。

Table 4 バケットの昇降サイクル数と掘削長に関する計測結果

| 土質 | 1サイクル当りの掘削長 L (m) | 標準偏差 σ (m) | 相関係数 | 計測個数 |
|-------|----------------------|----------------------|------|------|
| 沖積砂質土 | 0.407 | 2.45 | 0.95 | 396 |
| 沖積粘性土 | 0.404 | 2.05 | 0.99 | 396 |

$$\mu = \frac{1.04 \times 1.10 \times 2.50 \times 0.6}{0.75} \times 0.407 = 0.93$$

同様にして沖積粘性土の場合は $\mu = 0.91$ となる。以上の結果から β の値により若干異なるが1サイクル当りほぼバケット容量に近い土量を掘削していることになる。

(2) 掘削能率の試算

沖積砂質土層 ($N < 30$) 10m を油圧バケット ($a = 2.5$ m, $b = 0.6$ m) にて掘削する場合の掘削能率を求める。

$$N = \frac{(1 + \alpha) \cdot \beta \cdot a \cdot b \cdot L}{V_E}$$

$$= \frac{1.04 \times 1.1 \times 0.6 \times 2.5 \times 10.0}{0.93 \times 0.75} = 25$$

$$t_U + t_D = (3.71 + 3.52) \cdot h = 7.23 \times 10.0 = 72.3 \text{ (s)}$$

$$t_C = 71.4 \text{ (s)}, \quad t_S = 201.6 \text{ (s)}, \quad t_E = 152.0 \text{ (s)}$$

従って、「掘削」時間 T_K は次のとおりである。

$$T_K = 25(0.5 \times 72.3 + 71.4 + 201.6 + 152.0)$$

$$= 11530 \text{ (s)}$$

従って、標準能率 q は次のとおりになる。

$$q = \frac{10.0 \times 2.5 \times 60 \times 60}{11530} = 7.8 \text{ m}^3/\text{hr}$$

標準偏差 σ を考慮して 1σ の範囲を考えると、

$$q = 4.2 \sim 14.9 \text{ m}^3/\text{hr}$$

地中連続壁基礎協会積算基準(案)⁵⁾に基づく掘削能率は $q = 6 \text{ m}^3/\text{hr}$ 程度になり、本計測結果の範囲に入っている。

今後実績を収集し解析することにより、不確定要因を除去し、より信頼性のある掘削能率の推定が可能になるであろう。

§5. おわりに

今回実施した油圧バケットによる連壁施工時の計測結果およびその解析から、つぎに示す結論・知見を得た。

- ① 周囲を地下連続壁で囲まれた部分の掘削中の間隙水圧の変動は、周囲を閉塞されていない部分と比べて大である。すなわち、間隙水圧の変動に対する閉塞効果が確認された。

- ② 掘削時の間隙水圧の変動は、掘削方法によっては $1 \sim 2 \text{ tf/m}^2$ ($10 \sim 20 \text{ kPa}$) に達する場合もあり、溝壁安定解析時に考慮する必要がある。
- ③ タイムラプスビデオは単純反復作業のサイクルタイムの計測には有効な方法である。
- ④ 緩い沖積層の掘削では、1サイクル当り(バケット昇降1回当り)の掘削量は、ほぼバケット容量に等しい。
- ⑤ バケットの安定液中の平均昇降速度は、主フック巻上・巻下速度の60～70%程度である。
- ⑥ バケットが安定液から離れて排水・旋回・放土後再び安定液に戻ってくるまでの時間は、平均70秒程度である。
- ⑦ 今回の計測結果に基づく掘削能率は、地中連続壁基礎協会の積算基準(案)⁵⁾に基づくそれに近い値を示しているがバラツキが大きく、今後の実績収集による解析が必要である。

今回の地下連続壁工事は、当社独自の工事でもあり、今後の類似工事の参考になると思われる特殊な計測が実施できたと考えている。今後さらに多くの実績収集や計測を行い、地下連続壁施工時の溝壁安定問題の解明、掘削能率の算定方法の確立等を推進していくつもりである。

おわりにあたり、本計測について、いろいろとアドバイスをいただいた一般土木委員会連壁専門部会、統計的な整理方法に関して指導していただいた土木設計部西村副部長、および計測に関して全面的な協力をして頂いた中央復建コンサルタンツの各位に心から謝意を表する。

参考文献

- 1) 長野敏郎ほか：小断面連壁基礎の安定解析と施工，西松建設技報，Vol.12，pp.72～90，1989。
- 2) 中島裕之ほか：小断面連壁基礎の現地計測，土木学会第45回年次学術講演会，pp.992～993，1990。
- 3) 福田勇治ほか：連続地中壁基礎施工時の地盤計測，建設コンサルタンツ協会近畿支部第24回業務研究発表会論集，pp.135～142，1991。
- 4) 伊丹康夫：建設機械の管理と施工，財建設物価調査会，204p，1987。
- 5) 地中連続壁基礎協会：地中連続壁基礎工法，積算基準(案)，平成3年度版，pp.37～38，1991。