

地中連続壁工法に用いる安定液の 品質管理自動計測システムの開発

ファンネル粘度および比重を自動で連続的に精度よく測定

平井 裕二・吉野 修・中路 貴元

鋼製連壁やRC連壁といった地中連続壁工法で実施する安定液の各種品質確認は、長年、従来法（人手計測による試験）を実施しているため、省力化・省人化に向けて、これまでに様々な技術が開発されている。しかし、重要な試験の1つであるファンネル粘度は、安定液中の砂分や細粒分、粘性等の影響によりほとんど開発が進んでいないのが現状である。

今回、安定液試験項目のうち、ファンネル粘度および比重について、自動で連続計測できる「品質管理自動計測システム」を開発し、RC連壁の実施工現場に試験導入して、実用化可能であることを確認した。

本稿では、実施工現場での検討事項とその結果を紹介する。

キーワード：地中連続壁，安定液，細管式粘度測定装置，ファンネル粘度，比重，自動計測

1. はじめに

鋼製連壁やRC連壁で使用する安定液は、①溝壁の安定（崩壊防止）、②掘削土砂の運搬・分離、③良質な打設コンクリートとの置換という重要な役割を果たしている。また、これらの役割を果たせる品質が確認するため、通常、ファンネル粘度、比重、造壁性、pH等の試験を毎日（片番）1～2回実施し、安定液品質の良否判断を行っている。このうち、ファンネル粘度および比重については、上記の役割すべてに関連しているため、造壁性ととも品質を判断する上で重要な指標とされている。

一方、すべての安定液試験は人手（現場技術者による手作業）により実施しているため、①測定者の違いにより試験結果に誤差が生じる、②すべての試験結果が出揃うまでに時間がかかる、③試験回数が限られてしまうため、掘削に伴い安定液性状が急激に悪化した場合に対応が遅れ、掘削や打設コンクリートの品質に影響を及ぼすなどの課題が生じる場合がある。

そこで、筆者らはファンネル粘度および比重について、安定液試験の省力化・省人化、リアルタイム測定による安定液品質の表示と監視等を目的に、自動で連続計測できる「品質管理自動計測システム」の研究開発に着手した^{1), 2)}。

品質管理自動計測システムの心臓部となるファンネル粘度の計測は、現場で使用される安定液の粘性や含有する細粒分等を考慮し、細管式粘度計の原理を利用

した「細管式粘性測定装置」を製作し行った。また、比重は、泥水式シールド工法の泥水品質管理に実績のある密度計を地中連続壁工法に適用できるか検証することとした。

研究開発では、まず細管式粘性測定装置を用いて室内試験を実施することとした。室内試験では、模擬安定液の品質（砂の有無、凝集の有無など）を変化させ²⁾、人手計測による結果と細管式粘性測定装置から得られるファンネル粘度の値を比較しながら、製作した細管式粘性測定装置を改良し完成させた。同時に、密度計による比重の計測やPCによる遠隔監視等を行えるシステムも構築した。

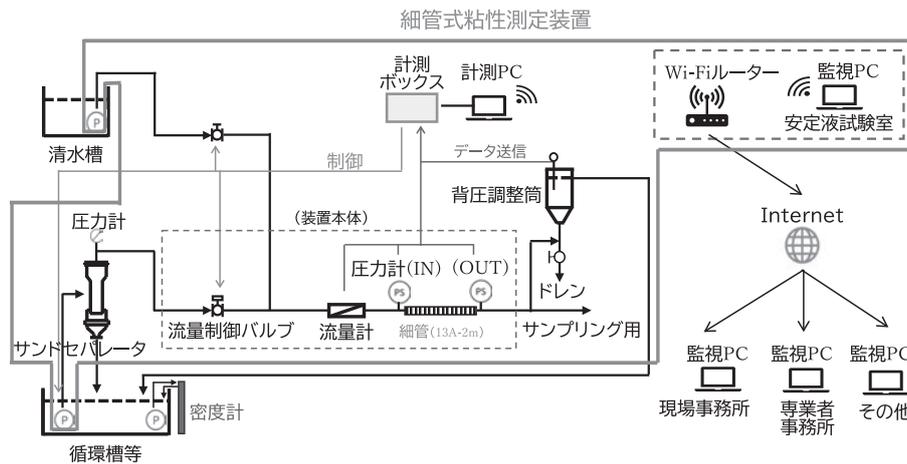
次に、品質管理自動計測システムが実施工現場の安定液品質管理に適用可能か判断するため、RC連壁の施工現場に設置し、現場実証試験を実施した³⁾。

現場実証試験では、現場で使用されている安定液を用いて室内試験と同様の確認を行い、品質管理自動計測システムの実用性および有効性について最終確認を行った。

2. 品質管理自動計測システム

品質管理自動計測システムは、図1に示す「細管式粘性測定装置」をはじめとする機器で構成されている。また、オプションとして密度計を設置することにより、比重の測定も可能となる。

測定中の画面および測定結果は、Wi-Fiやインター



図一1 安定液の品質管理自動計測システム

ネットを介して、任意の場所（安定液試験室や現場事務所等）に監視PCを設置することができ、モニターいつでも誰でも確認できる機能を有している。

以下、現場実証試験に使用したシステムを例に、構成する主な装置等について説明する。

(1) 細管式粘性測定装置の全体構成

細管式粘性測定装置は、写真一1に示すサンドセパレータ、装置本体（流量調整バルブ、流量計、圧力計 (IN,OUT)、細管）、背圧調整筒、計測ボックス、計測PC等で構成されている。

それぞれの機器は独立しており自由に配置できるが、サンドセパレータ、装置本体、背圧調整筒を写真のように一列に並べると幅約4m、奥行き約1m、高さ0.5～1m程度の大きさとなる。これら機器は、循環槽（鋼製水槽タンク）上に設置したステージに配置した。

(a) サンドセパレータ

安定液中の砂分を除去する装置である。

粘性測定に使用する安定液は循環槽からサンプリングするため、安定液中の砂分により細管等での堆砂や詰まりが生じないように、細管の前段にサンドセパレータを設置している。

(b) 細管

細管は、その入口および出口に取り付けた圧力計より差圧を求めるためのものであり、ファンネル粘度の算出に使用する。

長さは2mとし、配管径13Aの透明なアクリルパイプとした。透明なパイプを採用した理由は、配管内のトラブル（詰りや砂の堆砂等）の有無、清水洗浄後の配管内部を目視確認するためである。

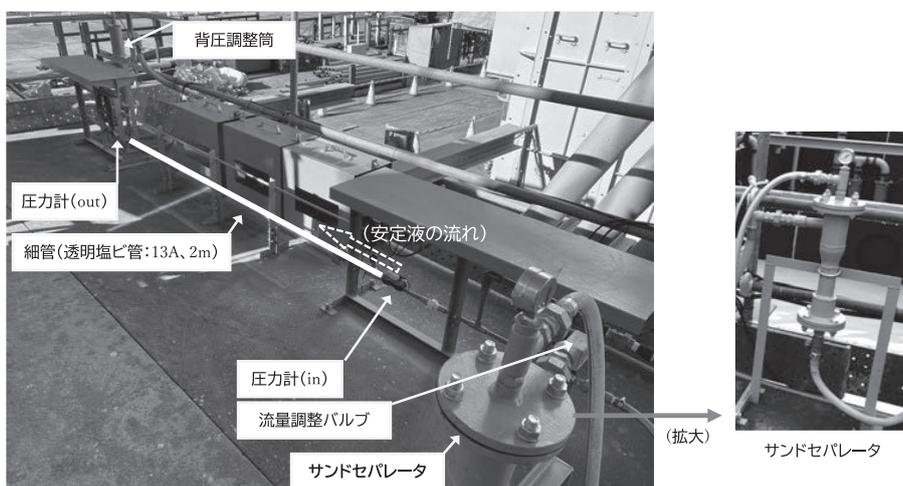
(c) 背圧調整筒

背圧調整筒は、配管内における安定液の圧力を安定化させるためのものである。

任意の背圧設定ができるよう、背圧調整筒は高さ調整が可能となっている。

(d) 計測ボックス、計測PC

計測ボックス内部には、シーケンサ、各信号の入出



写真一1 細管式粘性測定装置

力ユニットおよび動力回路を搭載した。各機器の制御および演算は、シーケンサ内部で処理を行い、計測PCと有線で接続している。また、ボックス前面に取り付けている小型のタッチパネルディスプレイでは、各機器の手動操作や設定値（安定液管理基準等）の入力が可能である。

計測PCは、測定値の表示および自動運転操作や設定値の入力などを行うものである(図-2)。なお、ファンネル粘度の測定は連続測定だけでなく、一定の時間ごとに測定する間欠測定設定、インターネットの接続による監視PCからの遠隔操作も可能である。

(e) 監視PC

監視PCは、計測PCの画面を遠隔で画面共有するものであり、写真-2は安定液試験室に設置した監視PCである。

現場実証試験を実施した安定液設備の配置により、細管式粘性測定装置は、写真奥(約30m先)にある循環槽上に設置したため、安定液の性状を人により常時監視することが難しかった。そのため、安定液試験

項目名	単位	瞬時値	流量F1	流量F2	流量F3	流量F4
設定流量	L/min	14.00	10.00	6.00	2.00	
状態						
給配ポンプ速度		6	7	8	8	
流量	L/min	0.00	14.05	9.95	6.01	2.01
圧力1	kPa	2.95	26.07	17.22	12.02	9.72
圧力2	kPa	2.95	10.53	9.49	8.85	8.40
差圧	kPa	0.00	15.55	7.73	3.17	1.32
ずり速度	sec ⁻¹		1085.7	768.9	464.4	155.3
ずり応力	dynes/cm ²		196.64	97.75	40.09	16.69
見掛粘度	mPa s		181	127	86	107
水温	°C	28.57	37.84	37.98	37.97	37.95
比重		1.13	24.34			27.16

図-2 計測PC画面



写真-2 安定液試験室に設置した監視PC

室に監視PCを設置して、計測PCの画面共有により安定液品質を確認できるようにした。

(2) 密度計

密度計は、水頭圧の差圧計測により流体の密度(比重)を算出する装置である。

密度計は循環槽脇に設置し、循環槽内に設置したサンプリングポンプより装置内の差圧測定部分へ安定液を循環させ、連続で安定液の密度を測定した。

3. 現場実証試験

試験期間、測定時間、安定液のサンプリング場所について、以下に記載する。

(1) 概要

(a) 試験期間

先行および後行掘削(コンクリートカッティング)の全期間(約11か月間)で実施した。

(b) 測定時間

掘削が行われている時間帯(8~17時)に測定するように設定した。しかし、24時間連続運転による機器トラブルの有無を確認するため、掘削エレメントごとに適宜運転時間を変更し測定した。

(c) 安定液のサンプリング場所

安定液のサンプリングは、細管式粘性測定装置および密度計ともに、人手計測による安定液試験と同様、掘削溝内への送泥安定液となる循環槽にサンプリングポンプを設置した。この場所でのサンプリングは、安定液試験では、掘削溝内へ送泥する安定液品質を管理することが重要とされていること、また、本現場では各試験項目の管理基準値は送泥安定液に対して設定しているためである。

(2) ファンネル粘度測定

測定条件、検証方法について、以下に記載する。

(a) 測定条件

細管式粘性測定装置の測定条件を、表-1に示す。流量は、製作した細管式粘性測定装置で安定した流量が得られる最小値の2L/minを基準とし、配管長

表-1 細管式粘性測定装置の測定条件

項目	条件
流量	・2, 6, 10, 14 L/min (= 4 流量1 サイクル)
その他	・1 サイクルあたり約15分 ・溝内送泥用安定液を測定

等との関係より、安定液が細管内で層流となる範囲で、任意に設定した4流量（2, 6, 10, 14 L/min）を1サイクルとして測定した⁴⁾。

測定は流量 14 L/min から開始し、測定開始から1分は設定流量に安定させるための待機時間、その後2分で設定した流量の差圧測定を行った。なお、差圧は約1秒おきに測定し、2分間の平均を流量に対する平均差圧（以降、「差圧」とする）として用いた。

流量 14 L/min の測定が終了すると、すぐに流量 10 L/min の待機時間へ移行し、以下同様な流れで差圧測定および流量移行（6 L/min → 2 L/min）を行った。4流量すべての測定が終了した時点で、細管等の内部洗浄のため、清水槽の水を使用し2分間洗浄を行った。洗浄後は、次の測定（サイクル）に移行して測定を繰り返すよう設定した。

(b) 検証方法

ファンネル粘度は、室内試験^{1),2)}と同様に、計測ボックスに記憶させる「検量線の選定」、次に「検量線を用いたファンネル粘度の算出と人手計測による結果との相関検証」を実施し、使用する検量線を確定した後、「掘削時におけるファンネル粘度の自動計測」を行った。

「検量線の選定」は、4流量のうち、どの流量がファンネル粘度の算出に適しているか判断するものであり、各流量における差圧と人手計測による結果との相関を検証し、最も相関等が強い流量の直線近似式を選定するものである。

「検量線を用いたファンネル粘度の算出と人手計測による結果との相関検証」は、選定した検量線に差圧を代入し、検量線より算出したファンネル粘度と人手計測による結果を比較して、検量線の妥当性検証を行った。

「掘削時におけるファンネル粘度の自動計測」は、細管式粘性測定装置および人手計測による経時変化の比較を行うことにより、細管式粘性測定装置の実用性および有効性について確認を行った。

(3) 比重

比重は、密度計の精度を確認するため、掘削時（先行、後行）における測定値と手動による計測結果を比較し検討した。なお、比重は約1秒おきに測定し、随時計測 PC の画面に表示した。

(4) データの記録および情報共有

測定データは、ファンネル粘度および比重を時系列に表示・記録できるようにした。また、表示したデータを誰でもどこでも見られるよう、安定液試験室およ

び現場事務所に設置した。

4. 現場実証試験結果

(1) ファンネル粘度

(a) 検量線の選定

図-3は、各流量における差圧と人手計測によるファンネル粘度との関係を示したものである。

結果として、流量が少なくなるにつれ、バラツキも小さくなる傾向を示した。また、相関係数も流量が少なくなるにつれ大きくなる傾向を示し、4流量のうち、流量 2 L/min において 0.76 と最大を示した。

次に、4流量の直線近似式に各流量における差圧を代入し、得られた値と人手計測による結果との差分の最大値、最小値および標準偏差から、直線近似式の評価を行った。その結果を表-2に示す。

表より、最小値は流量を変化させても大きな違いは認められなかったものの、最大値は流量が少なくなるにつれ、小さくなる傾向を示した。また標準偏差も、最大値と同様、流量が少ないほど小さくなる傾向を示し、標準偏差は 2 L/min の 1.2 が4流量の中では最小となった。

なお、過去の室内試験結果²⁾では、6 L/min の相関式が適していると考えられたが、安定液品質が一般的な管理基準値内（20～36秒）である場合、手で計測するファンネル粘度計（500 ml）の流速に換算すると約 1.0～1.8 L/min となり、今回の4流量では流量

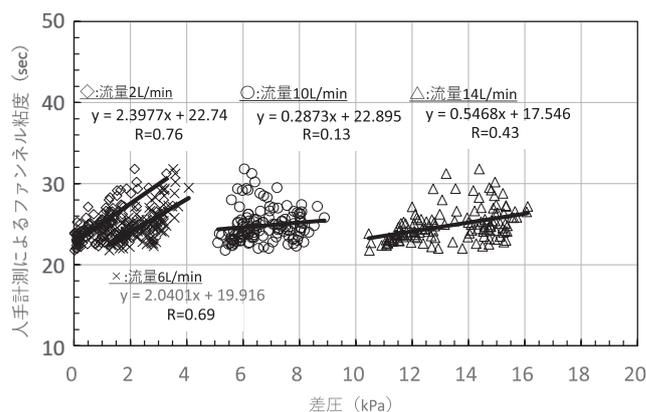


図-3 各流量における差圧と人手計測によるファンネル粘度との関係

表-2 各直線近似式への差圧代入と人手計測によるファンネル粘度の差分

流量	2 L/min	6 L/min	10 L/min	14 L/min
最大値	3.8	4.9	7.1	6.5
最小値	-3.4	-3.3	-3.1	-3.2
標準偏差	1.2	1.4	2.0	1.8

2 L/min がほぼ同等であること、また、本試験（実施工現場）の安定液を用いた試験結果では、流量 2 L/min が 4 流量の中で標準偏差も小さい値を示したことから、ファンネル粘度を算出する直線近似式は、流量 2 L/min における $y = 2.3977x + 22.74$ を選定することとした。

(b) 検量線を用いたファンネル粘度の算出と人手計測による結果との相関検証

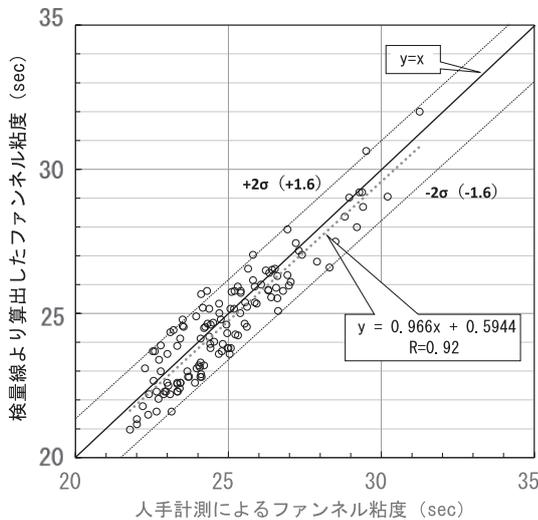
図一 4 は、人手計測による結果と、流量 2 L/min における直線近似式（検量線）に測定した差圧を代入して求めたファンネル粘度との関係を示したものである。

両者の相関係数は 0.92 と強い相関を示し、得られた直線近似の傾きも約 0.97 とほぼ 1 に近い値となった。また、算出したファンネル粘度の標準偏差は、 2σ の場合で ± 1.6 秒となり、人手計測時の人的誤差と大きく変わらない値となった。

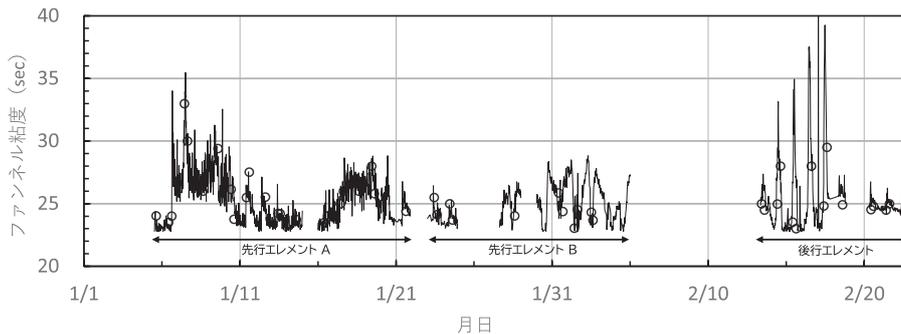
以上の結果を踏まえ、細管式粘性測定装置によるファンネル粘度の算出は、流量 2 L/min の直線近似式が検量線として妥当であると判断した。

(c) 掘削時におけるファンネル粘度の自動計測

図一 5 は、試験期間中における細管式粘性測定



図一 4 人手計測と検量線によるファンネル粘度の関係



図一 5 ファンネル粘度の経時変化

装置で求めたファンネル粘度（実線）と人手計測による結果（○印）との経時変化を示した一部である。

この期間は、先行エレメント A および B の掘削後、後行掘削に移行した時のものである。

先行エレメント A では、まず掘削初期（1/7～1/10）にファンネル粘度が大きく上下することがあった。これは、表層部に存在した微細粒子等の影響であり、管理基準値（20～36 sec）内へファンネル粘度を低下させるため、薬剤（炭酸ナトリウム）等を随時添加していた時期である。

細管式粘性測定装置により求めたファンネル粘度は、細かな粘性変化を捉えているものの、人手計測では、1日2回試験のため、その傾向が部分的にしか把握できなかった。一方で、両者を比較すると、細管式粘性測定装置によるファンネル粘度と人手計測の結果は、ほぼ同じ値を示していたことから、人手計測時以外は実線のような粘性動向を示していたと考えられる。

先行エレメント B では、初期掘削開始前に薬剤等を安定液に事前添加していたため、大きな粘性上昇は生じず、掘削終了まで、ほぼ管理基準値内で推移することができた。また、細管式粘性測定装置によるファンネル粘度は、先行エレメント A と同様、人手計測とほぼ同じ値を示していた。

後行エレメントでは、初期掘削前に薬剤等を安定液に事前添加してコンクリートカッティングによる粘性上昇に備えていたものの、掘削初期から中盤（2/14～2/18）に掘削スピードが速まるがあった。そのため、細管式粘性測定装置によるファンネル粘度測定結果から分かるように、一時的に粘性が管理基準値を超えていたことや、薬剤等の添加前後における粘性の激しい上下変化も一目で理解することができ、細管式粘性測定装置による粘性動向を踏まえた対応が可能となった。一方で、人手計測は細管式粘性測定装置による結果とほぼ同様な結果であり、先行掘削時に比べ粘性がやや高い傾向にあったことがうかがえるもの

の、細管式粘性測定装置のような細かな粘性推移を把握することは困難であった。

以上の結果より、細管式粘性測定装置によるファンネル粘度の測定は、「人手計測のない時間帯における粘性動向も視覚的に見える化できる」ことも判明し、細管式粘性測定装置の実用性および有効性についても確認することができた。

これにより、安定液の品質が悪化した場合、早期に改善検討と品質改善策を実施できると考える。また、溝壁の安定や打設コンクリートの品質維持に貢献できることに加え、安定液の再生薬剤使用量や廃棄安定液の低減に寄与できるものと考えている。

(2) 比重

密度計および人手計測による比重の関係を図-6に示す。

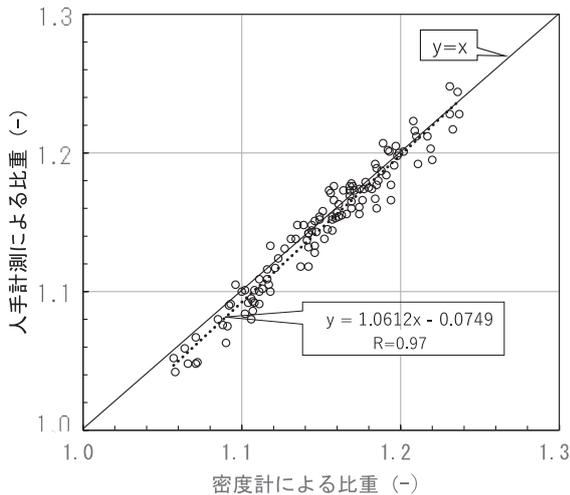


図-6 密度計と人手計測による比重の関係

図より、密度計と人手計測の相関係数は0.97、直線近似の傾きも1.06とほぼ1となった。この結果より、密度計は人手計測とほぼ同じ値を示すことが分かり、地中連続壁工法への適用も有効であることが確認できた。

(3) データの記録および情報共有

図-7は、粘性測定装置で測定したファンネル粘度、密度計で測定した比重等の経時変化を示したものである。図中の管理基準値は、あらかじめ設定画面上で入力した管理基準値がグラフ上に点線で表示される仕組みとなっており、試験項目ごとに単独でグラフ表示への変更も可能である。また取得したデータは、csvデータとして自動保存される。

これら測定結果は、インターネットを介して、あらかじめ安定液試験室や現場事務所に設置したモニターで遠隔監視を行った。これにより、元請け職員や安定液管理技術者をはじめとする専門家が、対応遅れが無いように現状の安定液品質を数値やグラフでいつでもすぐに確認できるようになり、全エレメントの掘削が終了するまで安定した品質を維持することができた。

5. おわりに

安定液の品質管理自動計測システム（ファンネル粘度、比重の測定および遠隔監視）を実施現場に導入し、以下の結果が得られ実用化に至ったと判断した。

- ①ファンネル粘度および比重ともに、人手計測と同様の試験結果が得られた。また細管式粘性測定装置による自動計測により、測定精度が向上した。
- ②人手計測時以外のファンネル粘度および比重を 24

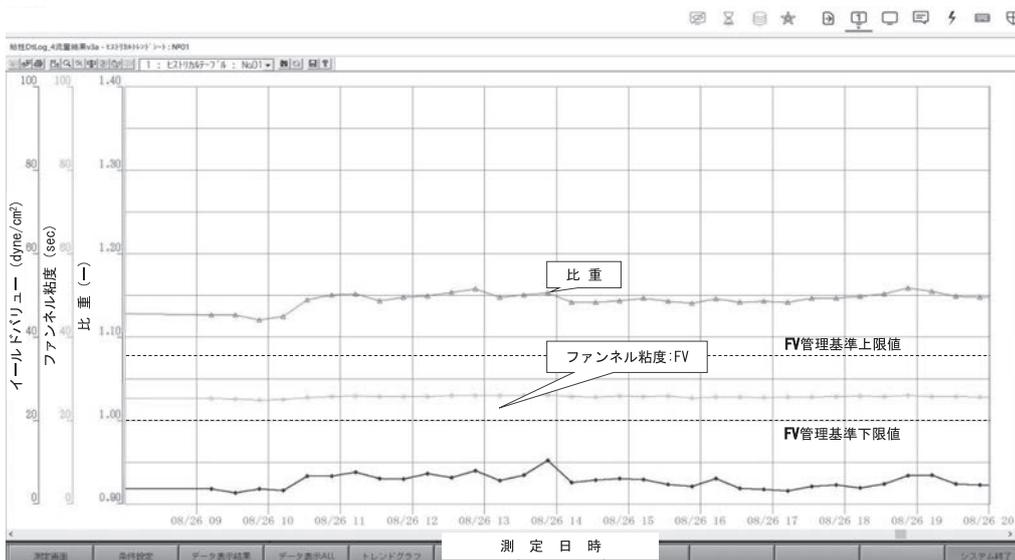


図-7 グラフ画面（一例）

時間連続自動運転したが、トラブルも確認されず、精度よく測定できた。

- ③現場事務所や安定液試験室など離れた場所でもリアルタイムに試験結果を遠隔監視することができるようになり、全エレメントの掘削が終了するまで安定した安定液品質を維持することができた。
- ④密度計は人手計測と同じ値を示し、精度よく測定することができた。このため、地中連続壁工法への適用も有効であることが確認できた。

また、今回の結果により、今後以下の効果等が期待できる。

- ・安定液管理の省力化および省人化
- ・安定液品質悪化時の早期発見ならびに早期対応による再生薬剤使用量や廃棄安定液の低減
- ・溝壁の安定や打設コンクリートのさらなる品質維持
- ・昼夜連続掘削時における安定液品質管理への対応
- ・安定液管理経験の少ない職員による品質管理

謝 辞

本開発を進めるにあたり、(株)ISIS 松下真矢氏にご指導・ご助言を頂きました。ここに御礼申し上げます。

J C M A

《参考文献》

- 1) 平井裕二、吉野修、中路貴元：地中連続壁工法に用いる安定液管理手法の開発、土木学会全国大会第77回年次学術講演会概要集、Ⅲ -29、2022.9
- 2) 平井裕二ほか：地中連続壁工法に用いる安定液管理手法の開発－ファンネル粘度の自動計測に関する検討－、土木学会第50回関東支部技術研究発表会概要集、Ⅵ -33、2023.3
- 3) 平井裕二ほか：地中連続壁工法に用いる安定液管理手法の開発－施工現場におけるファンネル粘度および比重の自動計測に関する検証－、土木学会全国大会第79回年次学術講演会概要集、Ⅳ -1164、2024.9
- 4) 沖野文吉：ボーリング用泥水、技報堂出版(株)、pp36-43、1981

【筆者紹介】

平井 裕二 (ひらい ゆうじ)
西松建設(株)
技術研究所 土木技術グループ



吉野 修 (よしの おさむ)
西松建設(株)
技術研究所 土木技術グループ
上席研究員 (グループ長)



中路 貴元 (なかじ たかもと)
(株)三央
営業部
次長

