

# 安定液の自動測定技術の開発

森下 智 貴

三浦 俊 彦

和知 康 晴

吉本 和 哲

(建築事業部品質管理部)

(東日本ロボティクスセンター)

## Development of Automatic Measuring Apparatus for Stabilization Slurry

Tomotaka Morishita

Toshihiko Miura

Yasuharu Wachi

Kazuaki Yoshimoto

### Abstract

A stabilization slurry, which is composed of bentonite and a CMC (carboxymethyl cellulose), is used in the excavation for a cast-in-place concrete pile work. The functions of the stabilization slurry in a pile construction are the protection of digging walls and replacement by cement. A stabilization slurry is used in a recirculation system for removing the dug earth with a sand separator. The values, specific gravity, viscosity, and sand content of the stabilization slurry should be measured to maintain its performance. We developed an automatic and continuous measurement apparatus based on the property of the stabilization slurry. Accordingly, it could detect the early deterioration sign of the stabilization slurry and share the information of its properties. Moreover, it could prevent the risk of degradation of the structure.

### 概 要

アースドリル工法などの場所打ちコンクリート杭における基礎工事には、ベントナイトとCMC(カルボキシメチルセルロース)を主体に作製された安定液が使用される。杭工事における安定液の働きは、掘削孔壁を保護することとコンクリート打設時の良好な置換流体となることである。安定液は砂分を沈砂槽や土砂分離機で排除しながら循環して利用されるが、その性能を維持するために、比重、粘度、砂分を測定して管理する必要がある。これまで、安定液の性状は1日に数回、断続的に測定され、安定液の不具合が発生した場合の正確な時刻や要因が特定できなかった。筆者らは、安定液の比重、粘性、砂分を連続的に自動測定できる測定装置を開発した。本装置により、安定液の劣化兆候の早期発見、安定液性状の情報共有が可能となり、安定液の劣化による品質低下、工期遅延のリスクを回避することができる。

### 1. はじめに

場所打ちコンクリート杭工事ではベントナイトとCMC(カルボキシメチルセルロース)などを水と混合して作製される安定液と呼ばれるスラリーが使用される。安定液は掘削中に掘削孔に充填され、造壁性を発揮することで掘削孔壁を保護し、コンクリート打設時には置換流体として機能する。また、安定液は循環利用されることから(Fig. 1)、土砂の混入や基本材料の損失により、その性状は施工の進行に伴い変化する。杭の品質を維持するためには、安定液を適正な状態に維持する必要があるため、比重、粘度、砂分などを測定して基準値内であることを確認して管理される。通常、安定液の性状は1日に数回の断続測定であるため、安定液の不具合が発生した場合、その発生時刻、原因が特定できなかった。また、安定液の劣化が顕著となれば薬剤による調整(Table 1)や廃棄処理が必要となり、工期や廃棄費用に影響が出ることもあった。筆者らは安定液の比重、粘度、砂分を連続的に測定、蓄積し、かつ、リアルタイムで関係者が測定値を把握できる安定液自動測定装置(以下、本装置)を開発した。

本装置の導入メリットを以下に示す。

- ① 安定液性状を連続的に計測・記録できるため、安定液に不具合が生じた場合の原因考察に有力なデータとなる。
- ② 安定液の初期劣化を検出し、対処できるので管理基準値内にするための調泥が容易であり、安定液廃棄コストの削減、不具合による掘削停止を予防できる。

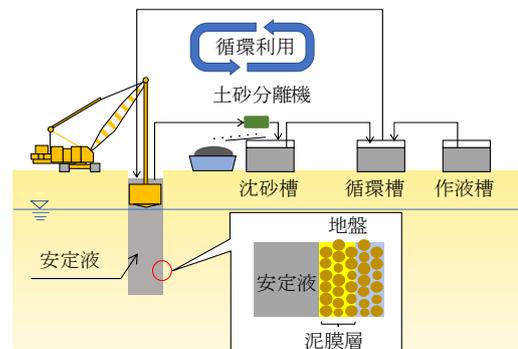


Fig. 1 安定液を使用する場所打ちコンクリート杭工事  
Cast-in-place Concrete Pile Work Using Stabilization Slurry

Table 1 安定液の劣化による施工への影響と対策の例  
Examples of Adjustment for Stabilization Slurry

劣化現象	施工への影響	対策
比重上昇	砂分の上昇によるスライム量の増加, コンクリートへの土砂の巻込み	分散剤の追加 加水による希釈 土砂分離機追加
粘度上昇	土粒子が沈降しにくくなり, 孔内に残るスライムを除去しにくくなる	分散剤の追加 加水による希釈
粘度低下	掘削孔壁が崩壊しやすくなる	CMCの追添加 防腐剤の添加 ソーダ灰の添加

③ 施工者, 管理者らが安定液の情報をリアルタイムで共有できるので, 安定液の不具合に対する調泥や廃棄などの状況判断がしやすくなる。  
本報では, 本装置の概要と測定原理, 性能確認試験および現場適用事例について報告する。

## 2. 技術の概要

### 2.1 安定液自動測定装置

本装置の概要をFig. 2に示す。本装置は安定液の循環槽にポンプを設置して安定液を取り込み, 測定後, 安定液は受け水槽から循環槽へと移送される。安定液の取り込み方法として, この他にも安定液の移送配管から分岐させて供給液, 回収液を本装置に取り込み, 測定後にラインに返送することも可能である。

比重, 粘度は, 取り込んだ安定液を本装置内で循環させて測定, 記録する。砂分は, 本装置のライン中でサイクロン式サンドセパレーター(以下, サイクロン)に安定液を通過させ, 安定液中の75 $\mu$ m以上の土粒子を排除して通過前後の比重差を砂分に換算して求める。サイクロンの分級能力は, 供給・排出する液体の流量に起因する。そのため, 供給する安定液流量(IN流量), サイクロン通過後の安定液の流量(OUT流量)は電磁弁を使用して自動で流量を制御した。除去した砂とともに外部に排出される流量(UNDER流量)はIN流量とOUT流量の差で計算される(Fig. 3)。本装置ではサイクロンの流量も測定しており, サイクロンの運転状況についても確認できる。データは数秒ごとに取得可能であり, リアルタイムの測定値は本装置に備えるタッチパネルに表示されるので現地で確認できる。また, 測定値はロガーに蓄積され, 関係者はシステム上で確認でき, サイクロン流量や換算値の定数を遠隔で設定することもできる。

### 2.2 測定原理

2.2.1 比重 上部を開放した一定体積の容器に, 下端から安定液を連続的に取り込み, 一定体積の安定液の

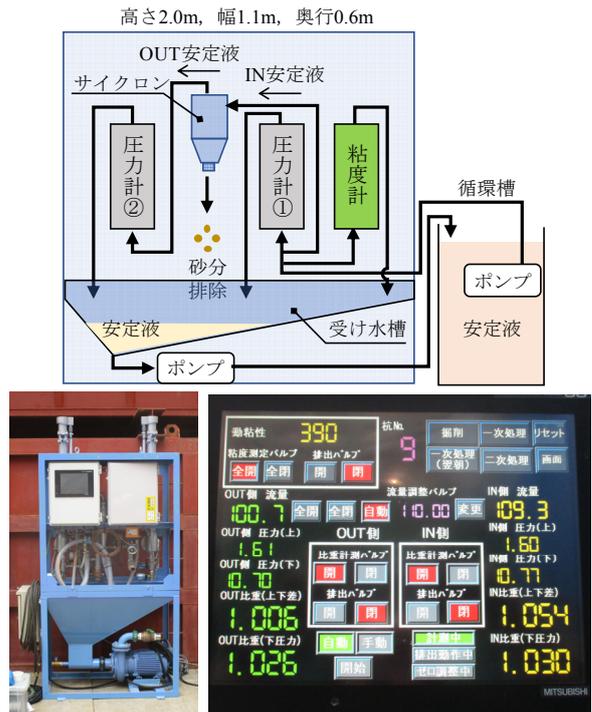


Fig. 2 本装置の概要(画面は開発中のもの)  
Automatic Measuring Apparatus for Stabilization Slurry

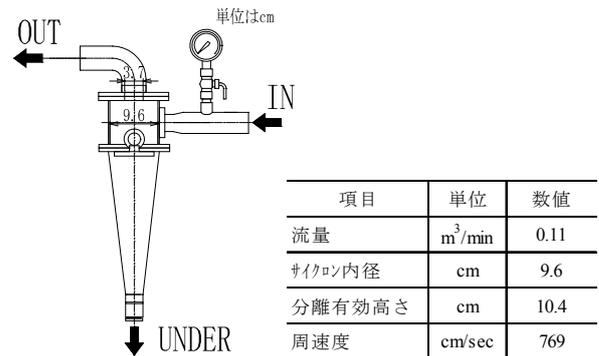


Fig. 3 本装置に配置したサイクロンの概要  
Cyclone Separator in Apparatus

質量を容器下端に設置した圧力計で測定し, その出力から質量として比重を換算した。後述する砂分測定のためにサイクロン通過前と通過後の2か所設置し, サイクロン通過前に測定された比重を安定液の比重として取り扱う。

2.2.2 粘度 粘度は, これまでファンネル粘度計と呼ばれる漏斗型の測定器を一定量通過する時間を管理基準値として使用してきた。本装置では, 粘度測定にファンネル粘度計と相関が高い, 振動式粘度計を採用したり。

2.2.3 砂分 砂分は, 安定液中に存在する粒径が75 $\mu$ m以上の土粒子の体積割合を示す。本装置はサイクロン通過前後の比重差から除去された砂分を算出し, 比重や粘度と同様に時間ごとの砂分の推移を示すことができる。比重差からの砂分の算出方法は次の通りである。

砂分は, 一定量の安定液を75 $\mu$ m篩に通過させ, 残った砂を砂分計に投入し, そこに堆積した体積を目盛りで

Table 2 従来法と本装置の測定法

Usual Method and Automatic Method for Measurement		
項目	従来法	本装置
比重	マッドバランス (容器法)	一定量の安定液を 圧力計で測定
粘度	ファンネル粘度計	振動式粘度計
砂分	砂分率計	サイクロン前後の 比重差から計算

Table 3 性能確認試験に使用した安定液  
Stabilization Slurry Used in Performance Tests

比重・砂分測定			粘度測定		
種類	比重	F.V.	種類	比重	F.V.
A安定液	1.05	25	G安定液	1.02	26
B安定液	1.06	33	H安定液	1.00	18
C安定液	1.05	29	I安定液	1.10	29
D安定液	1.04	31	J安定液	1.04	27
E安定液	1.08	24	K安定液	1.02	37
F安定液	1.13	27	L安定液	1.03	45

F.V. : ファンネル粘度(秒)

読み取った値である<sup>2)</sup>。したがって、測定した砂分とその砂を除去した場合の質量差 $\Delta m_1$ は、シリンダー内で堆積する砂の間隙率を $n$ 、土粒子密度を $\rho_s$ 、砂分を $x\%$ 、サイクロン通過前、後の安定液比重をそれぞれ $\rho_{in}$ 、 $\rho_{out}$ とすると、安定液100mLについて(1)式で表される。

$$\Delta m_1 = (\rho_s - \rho_{out}) \times (1 - n / 100) \times x / 100 \times 100 \quad (1)$$

一方で、安定液100mLあたりのサイクロン通過前後の安定液による質量差 $\Delta m_2$ は(2)式で表される。

$$\Delta m_2 = (\rho_{in} - \rho_{out}) \times 100 \quad (2)$$

$\Delta m_1 = \Delta m_2$ から、 $\alpha$ を定数として、砂分 $x$ は(3)式の通り導かれる。 $\alpha$ は安定液の配合ごとに特有の値であり、従来法により測定される砂分と(3)式で計算される砂分との最小二乗法で求められる。

$$x = \alpha \times (\rho_{in} - \rho_{out}) / (\rho_s - \rho_{out}) \quad (3)$$

また、サイクロンは砂を一定の効率で除去できる能力が求められる。一般的に、静置した安定液中の砂の沈降速度はストークスの式で計算されるが、サイクロン中では、重力加速度を遠心力に置き換え、(4)式で計算される。

$$V = \frac{(\rho_s - \rho_f)gD^2}{18\mu} = \frac{(\rho_s - \rho_f)V_t^2 D^2}{18\mu r} \quad (4)$$

ここで、 $V$ : 沈降速度 (cm/s)、 $\rho_s$ : 粒子密度 (g/cm<sup>3</sup>)、 $\rho_f$ : 水の密度 (g/cm<sup>3</sup>)、 $g$ : 重力加速度 (cm/s<sup>2</sup>)、 $\mu$ : 安定液の粘度 (g/cm・s)、 $D$ : 砂粒子の直径 (cm)、 $r$ : 遠心場の半径 (cm)、 $V_t$ : サイクロンの周速度 (cm/s)

三浦ら<sup>3)</sup>はサイクロンで処理される場合の安定液の粘度は、およそ10mPa・sとなることを示した。これは、水の粘度(1mPa・s: 20°C)の10倍であり、(4)式に示すように沈降速度が0.1倍となるため、サイクロンの砂分除去効率は溶媒が水の場合に比べて低下すると考えられる。安定液の砂分除去効率を試験的に確認し、その効果を検証した結果を次章に示す。

### 3. 性能確認試験

#### 3.1 試験概要

3.1.1 概要 本装置で連続測定される比重、粘度、砂分と従来法による値を比較し、測定値の精度を確認した。また、サイクロン通過前後の安定液の粒度から、砂分の除去効率について検討した。

3.1.2 試料 試験に使用した安定液の材料は、ベントナイト、CMCをベースに、適宜、比重を調整する粘土(トクレー)を添加した。添加した砂は75 $\mu$ m未満の粒度を除去した8号珪砂であり、添加量が砂分に直接反映される材料とした。安定液は200L作液し、本装置の下部水槽で沈殿しないように攪拌しながら使用した。

3.1.3 試験方法 Table 2に示す項目について、本装置(Fig. 2)と従来法による測定結果を比較した。図中に示すサイクロン通過前後の圧力計を設置した容器をそれぞれ圧力計①、圧力計②、粘度計を設置した容器を粘度計と呼称する。試験手順は次の通りである。

- 1) 本装置に作液した安定液を循環させて、5秒ごとに比重と粘度を自動測定。
- 2) 循環開始から10分経過後に圧力計①、圧力計②、粘度計から受け水槽に排出される安定液を採取して従来法により比重、粘性、砂分を測定。
- 3) 循環している安定液に75 $\mu$ m以上の粒度となるよう調整した8号珪砂を一定量添加して砂分を増加させる。
- 4) 砂を添加して10分経過後に2)、3)を繰り返し実施。

使用した安定液は比重、粘度の異なるそれぞれA~F、G~Lの安定液である(Table 3)。比重は圧力計①で測定された値で、砂分は圧力計①、圧力計②で測定された比重の差を使用して計算した。また、採取試料の粒度試験を実施し、サイクロンによる砂分の除去効果を確認した。粘度は、G~Lの安定液で試験し、振動式粘度計で測定された粘度と粘度計から採水した安定液のファンネル粘度(従来法)を比較することで相関性を確認した。

#### 3.2 試験結果および考察

3.2.1 測定結果 Fig. 4に、A安定液の試験において添加した砂の質量とそれに伴う比重の変化を示す。サイクロン通過前の安定液比重をIN比重とし、通過後の比重をOUT比重と表記した。砂は安定液200Lに対し、累積で3、6、9、15kg添加した。砂の添加に伴い、IN比重は上昇したが、OUT比重は一定値を維持した。これは、比重増加の原因となった砂がサイクロンで除去されて、OUT比重には影響しなかったためである。Fig. 5にサイクロンのIN側流入およびOUT流量の推移を示す。サイクロンに流入する安定液の流量(IN流量)、サイクロンで砂が除去された安定液の流量(OUT流量)は、それぞれ110L/分、100L/分と設定しており、概ね一定の流量を示していた。

3.2.2 比重 採水した時間の前後一分間の自動測定

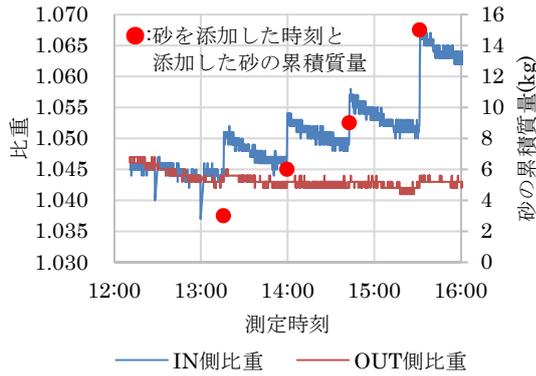


Fig. 4 添加した砂の質量とそれに伴う比重の変化  
Change of Specific Gravity with Sand Addition

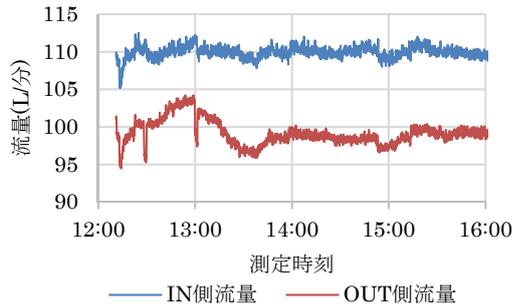


Fig. 5 サイクロン流量の推移  
Change of Flow Quantity to Cyclone

の平均値と従来法で得られた測定値を比較して、自動測定の妥当性を検証した。Fig. 6に比重測定結果を示す。従来法による比重と自動測定による比重はほぼ1:1で推移した。粘度、安定液の組成が異なる場合でも、精度よく比重を測定することが可能である。

**3.2.3 粘度** Fig. 7に粘度測定結果を示す。粘度は安定液比重にかかわらず連続測定と従来法によるファンネル粘度で良い相関が得られた。現場適用時には振動式粘度計の値をファンネル粘度に換算して使用できる。粘度は安定液がセメントと接触した場合などに上昇することがあり、劣化の状況を監視する指標としても活用できる。

**3.2.4 砂分** 砂分は、前述の通り、サイクロンにより除去された比重差から換算して求められる。これには、安定液に含まれる砂分が確実に除去されていることを確認する必要がある。ここでは、A安定液についてサイクロンを通過する前後の砂の分布を確認し、その比重差から得られる換算砂分値と実測の砂分を比較して妥当性を確認した。Table 4にA安定液における、添加した砂の質量とサイクロン通過前(IN安定液)、通過後(OUT安定液、UNDER安定液)の砂分の値を示す。ここで、OUT安定液はサイクロンで砂分が除去された安定液であり、UNDER安定液は除去された砂分を含む安定液である。安定液への砂の添加に伴い、IN安定液とUNDER安定液の砂分は上昇したが、OUT安定液の砂分は概ね0%であった。これは、IN安定液に含まれる砂分がサイクロンにより除去され、UNDER安定液に排出されたことを示している。また、サイクロンが排除した安定液の粒度画分を確認するため、

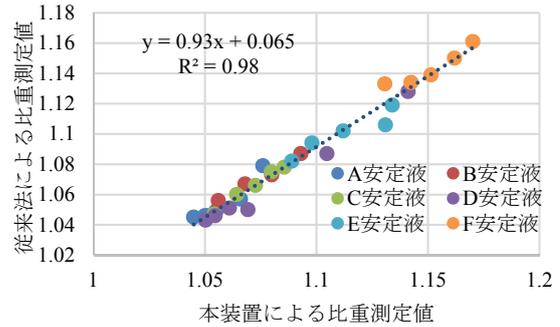


Fig. 6 比重における従来法と自動測定の比較  
Relationship between Usual Method and Automatic Measurement in The Specific Gravity

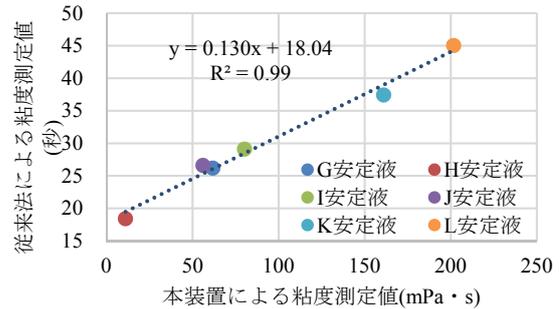


Fig. 7 粘度における従来法と自動測定の比較  
Relationship between Usual Method and Automatic Measurement in The Viscosity

A安定液に9, 15kg砂を添加した安定液におけるサイクロン通過前後のIN安定液とOUT安定液で粒度試験を実施した。Fig. 8には砂を15kg添加した場合の粒度試験結果を示す。OUT安定液の通過質量百分率は75 $\mu$ mで98%で、粒径75 $\mu$ m以上の砂はほとんど含まれておらず、逆に、UNDER安定液では75 $\mu$ m以上の粒径を含む割合が多く、サイクロンにより75 $\mu$ m以上の画分の土粒子がUNDER安定液とともに排出されることが分かる。まず、IN安定液とOUT安定液における各画分の存在質量をFig. 9に示す。土粒子の粒径が20 $\mu$ m以上の場合に差がみられた。これは、粒径75 $\mu$ m未満の粒径でもある程度サイクロンにより除去されることを示している。

また、OUT安定液の存在質量は、9, 15kgの添加においてほぼ同様の分布であることから、サイクロンは安定して砂を除去しているといえる。IN安定液とOUT安定液の粒度分布を比較して、所定の粒径の土粒子がどの程度除去されるのかを示すグラフをトロンブ曲線(分離配分率曲線)と呼ぶ<sup>4)</sup>。これは、一定体積の安定液に含まれる所定の粒径画分の土粒子の質量を計算し、IN安定液からOUT安定液の各画分の質量の差を取り、粒径ごとに積算したグラフである。Fig. 10はA安定液のトロンブ曲線である。トロンブ曲線における50%の回収率の粒径を分級点d<sub>50</sub>と呼ぶ。本装置では、設計値がd<sub>50</sub>=30 $\mu$ mのサイクロンを選定した。砂を9, 15kg添加した場合の分級点はそれぞれ、44, 81 $\mu$ mとなり、設計値よりも大きい値となった。設計値は溶媒が水の場合であり、安定液ではその粘

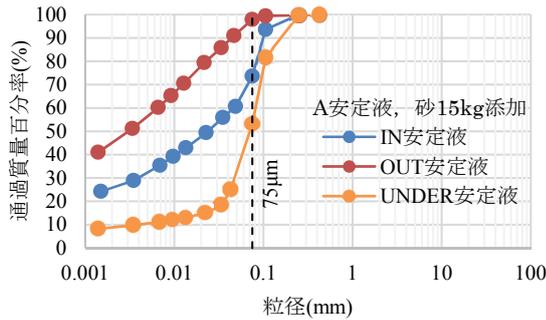


Fig. 8 粒度試験結果(A安定液, 砂15kg添加)  
Grading Curves of A Slurry with 15 kg Sand

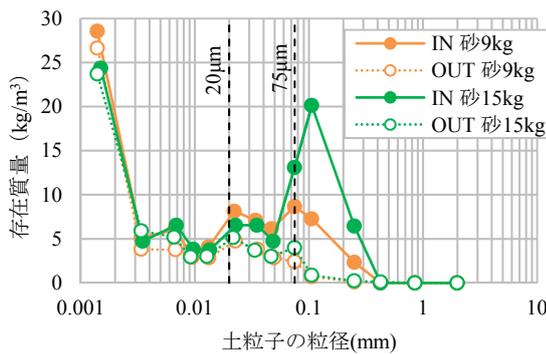


Fig. 9 A安定液中の土粒子の存在質量の分布  
Distribution of Mass of Soil Particles in A Slurry

度や比重によりサイクロンの効果が低下したと考えられる。一方で、Fig 11に示すように換算砂分と砂分測定値を比較すると、安定液は配合ごとに高い相関を示した。これは、それぞれの配合で換算砂分と測定値が1:1となるように $\alpha$ を最小二乗法で最適化して示したものである。このように、安定液の配合の影響により砂分の除去効率は低下するが、低下水準は一定の割合であり、比重差からの換算砂分は従来法の砂分と良い相関が得られたと考えられる。したがって、現場で適用する場合は、その配合でキャリブレーションを行い、 $\alpha$ を定める必要がある。

#### 4. 現場適用事例

##### 4.1 現場条件および測定方法の概要

実現場の安定液における本装置の実用性を確認することを目的として、杭工事に適用した事例を示す。杭はアースドリル工法で軸部径 $\phi 1600\text{mm}$ 、拡底径 $\phi 1800\sim 2200\text{mm}$ の場所打ちコンクリート杭であり、杭長20mで杭本数は12本であった。施工期間中の1.5カ月間、常時本装置を設置した。

測定した安定液は杭孔への供給液である。循環槽からポンプにて安定液を本装置に送液し、試験後は水槽に返還する循環システムとした。併せて従来法での測定も実施し、測定値を比較した。本装置は省スペースに設置可能であり、杭の施工環境に十分対応できる。

Table 4 添加した砂の累積質量とA安定液の砂分

添加した砂の累積質量 (kg)	従来法で測定された砂分(%)		
	IN安定液	OUT安定液	UNDER安定液
0	0.1	0	1.5
3	0.5	0	2
6	0.7	0	5.5
9	1	0	8
15	1.5	0.1	15

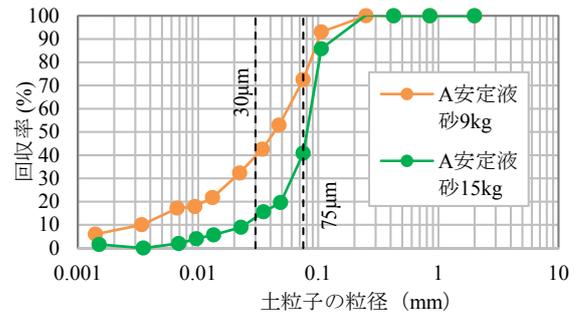


Fig. 10 トロンプ曲線(A安定液, 砂9, 15kg添加)  
Tromp Partition Curve of A Slurry

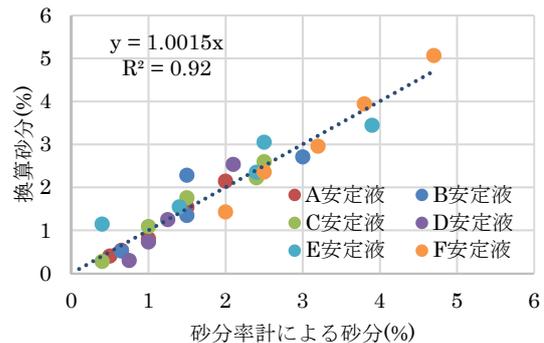


Fig. 11 砂分における従来法と自動測定の比較  
Relationship between Usual Method and Automatic Measurement in The Sand Content

#### 4.2 測定結果

##### 4.2.1 測定状況

本装置を現場に設置して計測した1日の測定状況を示す。この日の工種は掘削工のみであった。Fig. 12では比重と粘度の推移を示す。自動測定のデータは本装置で測定しており、このうち粘度の連続データはFig. 15に示す相関式から換算した値で、プロットは従来法で測定した値である。従来法ではプロットで示されるデータしか確認できないが、本装置ではその間の例えば11~12時における比重、粘度の上昇も把握することができた。

生コン打設前の供給液の砂分は1%以下で管理されることがあるが<sup>5)</sup>、本現場で測定された従来法による砂分は概ね0.5%以下であり、良好な状態であった。Fig. 13に換算砂分の推移を示す。換算砂分は(3)式で計算されるが、本現場ではキャリブレーションで $\alpha$ を算出できなかったため、性能確認試験で得られた $\alpha$ の値のうち、安定液の配合が同様であった値を使用して計算した。砂分測定値は

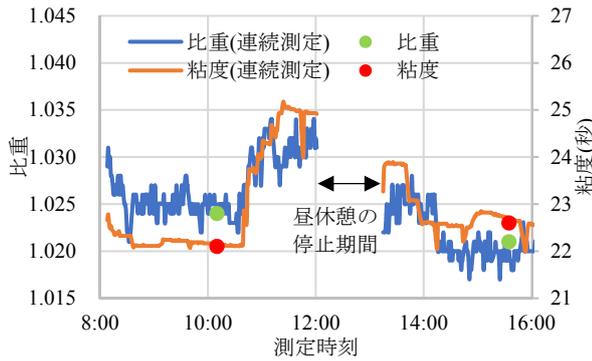


Fig. 12 現場における比重、粘度測定結果  
Specific Gravity and Viscosity in Building Site

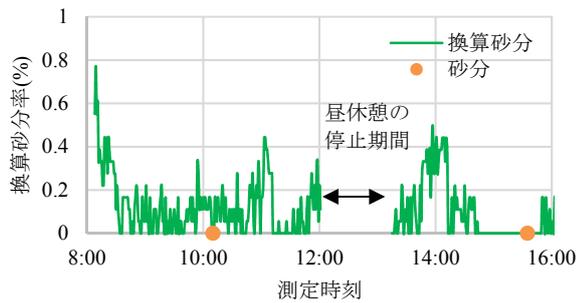


Fig. 13 現場における換算砂分の推移  
Change of Converted Sand Content Ratio in Building Site

杭の品質管理上問題ない数値であったが、本装置による測定結果から、施工開始直後において比較的高い値を示していたことが確認できた。これらの結果から、これまで断続的だった安定液の情報が連続的に示され、施工の状況で変化する安定液の数値を追うことが実証できた。

**4.2.2 従来法と自動測定とのデータ相関** 測定期間中の全データを使用して、従来法と自動測定の相関性について検討した。比重に関してはFig. 14に示すように、直線関係にあり、両者の差の絶対値は最大で0.0047であった。一般的に比重は小数点2位まで記録されることから、この程度の誤差であれば施工管理上問題ない。Fig. 15は粘度についての相関であり、本装置と従来法の値は高い相関が得られた。

## 5. まとめ

場所打ちコンクリート杭の安定液性状を連続的に測定することで迅速な劣化把握を行い、また、情報共有を行うことを目的として安定液の自動測定装置を開発した。本稿で得られた内容を以下にまとめる。

- 1) 本装置で得られた安定液の比重は性能確認試験、および現場測定の結果から、従来法と概ね同様であり、比重の連続的な把握が可能であった。
- 2) 本装置で得られた安定液の粘度は、従来法と比例関係にあり、両者の相関式からファンネル粘度に換算することで、粘性を連続的に把握できた。

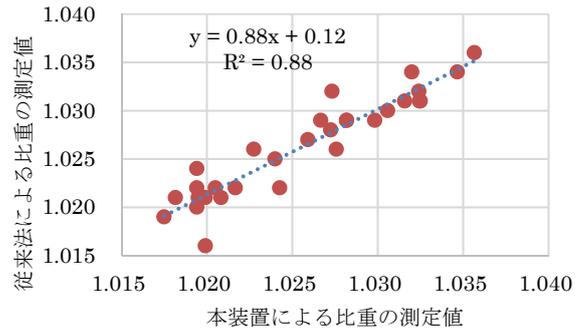


Fig. 14 現場での従来法と本装置による比重の比較  
Relationship between Usual Method and Automatic Measurement in Specific Gravity

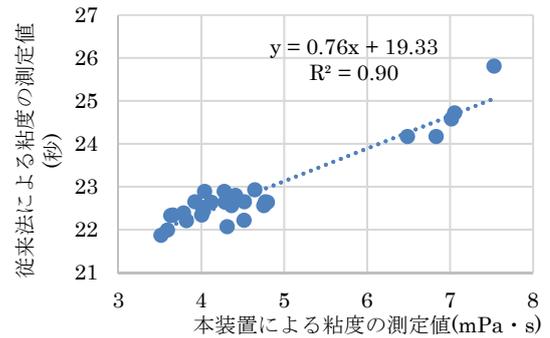


Fig. 15 現場での従来法と本装置による粘度の比較  
Relationship between Usual Method and Automatic Measurement in Viscosity

- 3) 本装置で得られたサイクロン通過前後の比重差から連続的に安定液の砂分を示すことができた。換算式の定数 $a$ は安定液配合により異なるため、適用にはキャリブレーションを行う必要がある。
- 4) 実際に適用する場合には、従来法と本装置の測定値を併せて検討し、安定液性状を総合的に評価することが望ましい。

## 参考文献

- 1) 森下智貴, 他: 振動式粘度計による安定液の粘度測定, 土木学会第73回年次学術講演会講演概要集, pp. 265-266, 2018.9
- 2) 日本基礎建設協会: 場所打ちコンクリート杭施工指針・同解説, pp. 133-135, 2016.
- 3) 三浦俊彦, 他: 安定液の配合がセメント混入による安定液劣化に与える影響, 2019年度日本建築学会大会学術講演会, pp.413-414, 2019.
- 4) 喜田大三, 他: 土工事における濁水処理に関する研究(第17報) サイクロンによる砂の除去に関する研究(その2), 大林組技術研究所報, No. 27, pp. 112-116, 1983.
- 5) 日本建設業連合会 地盤基礎専門部会: 場所打ちコンクリート杭の品質管理のポイント, p.4, 2017.6.