

土質標本瓶を介した帯磁率測定の有効性

株式会社レアックス ○加藤 欣也、石井 啓滋、大山 朝之、向井 和行

1. はじめに

携帯型帯磁率計は、地盤の磁性鉱物の多寡やその変化傾向を容易に把握できるツールであり、ボーリング試料への適用も可能である。土質ボーリング試料を測定する際、コア箱に収納された状態では金具等による測定値への影響が懸念されるため、コア箱から試料を取り出して測定することが望ましいが、試料数が多い場合は著しい時間を要する。標本瓶を直接測定する方法が作業効率の面で有効と考えられるが、各試料状態の差異 (①充填具合、②含水状態) が測定値に影響する懸念がある。

そこで本報告では、標本瓶を用いた帯磁率測定の実用上の有効性を検証するため、『標本瓶試料』と、各試料状態の差異が小さくなるようにした『調整試料』のそれぞれの帯磁率を比較し、条件の差異による帯磁率の影響を評価した。

2. 使用機器

測定計器はTerraplus社製KT-10 v2を使用した。測定範囲は $0.001 \times 10^{-3} \text{SI} \sim 2 \text{SI}$ 、センサーの透過深度は約4cmであり、センサーから深さ2cmまでに測定値の約90%を取得する¹⁾。なお、測定面は各容器の平坦面である底面とし(写真-1)、10回測定の実験値を測定値とした。

3. 標本瓶試料と調整試料の相関

(1)測定試料

測定試料は第四紀の堆積物を対象としたボーリング孔の標準貫入試験試料およびカッティングス試料の合計548試料、土質は礫質土、砂質土、粘性土、火山灰質土、有機質土である。

(2)検証方法

標本瓶試料と調整試料の帯磁率が同様の傾向を示すか検証するため、以下の2種類の容器を用いて帯磁率を比較した。

① 標本瓶試料

- ・容器：標本瓶 (直径約4cm、高さ約8cm、容積約100ml)
- ・試料：掘進作業中に試料を標本瓶に収めた状態。各試料の充填具合と含水状態にばらつきがある。

② 調整試料

- ・容器：カップ容器 (直径約3cm、高さ約2cm、容積約17ml)
- ・試料：標本瓶試料と同一の試料を恒温槽の温度設定50℃で1日乾燥させた後、カップ容器に満杯に充填した状態。各試料の充填具合と含水比の差異は小さい。なお、調整試料を標本瓶に詰め替えると、試料の厚みは約1.4cmに相当する。



写真-1 測定状況(左:標本瓶試料、右:調整試料)

(3)検証結果

図-1に標本瓶試料と調整試料による帯磁率の散布図、表-1に各土質の帯磁率の統計処理結果一覧表を示す。

標本瓶試料の帯磁率の範囲は $0.024 \times 10^{-3} \text{SI} \sim 8.31 \times 10^{-3} \text{SI}$ 、平均値は $1.85 \times 10^{-3} \text{SI}$ であるのに対し、調整試料の範囲は $0.006 \times 10^{-3} \text{SI} \sim 8.70 \times 10^{-3} \text{SI}$ 、平均値は $1.49 \times 10^{-3} \text{SI}$ である。全ての土質において、平均値は調整試料が標本瓶試料より低く、全体の相関式は $y=0.75x$ を示す。

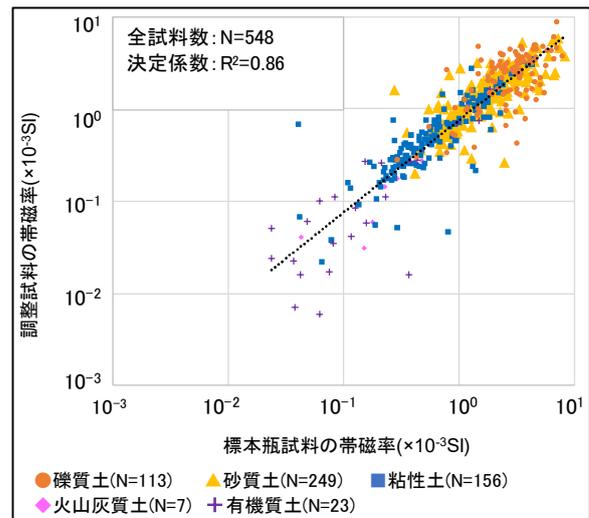


図-1 標本瓶試料と調整試料による帯磁率の散布図

表-1 各土質の帯磁率の統計処理結果一覧表

土質区分	試料	測定数	帯磁率(測定値)(10^{-3}SI)				相関式(決定係数) y:調整試料 x:標本瓶試料
			最小値	最大値	平均値	標準偏差	
礫質土	調整試料	113	0.278	8.70	2.64	1.41	$y=0.78x$
	標本瓶試料	113	0.300	7.97	3.16	1.53	($R^2=0.84$)
砂質土	調整試料	249	0.200	5.85	1.62	1.04	$y=0.72x$
	標本瓶試料	249	0.279	8.31	2.07	1.41	($R^2=0.88$)
粘性土	調整試料	156	0.022	3.46	0.695	0.650	$y=0.77x$
	標本瓶試料	156	0.041	4.50	0.858	0.810	($R^2=0.91$)
火山灰質土	調整試料	7	0.031	2.62	0.478	0.878	$y=1.06x$
	標本瓶試料	7	0.044	2.39	0.539	0.766	($R^2=0.98$)
有機質土	調整試料	23	0.006	1.63	0.213	0.361	$y=0.70x$
	標本瓶試料	23	0.024	1.91	0.313	0.482	($R^2=0.92$)
合計	調整試料	548	0.006	8.70	1.49	1.26	$y=0.75x$
	標本瓶試料	548	0.024	8.31	1.85	1.54	($R^2=0.86$)

(4)考察

標本瓶試料と比較して、調整試料の帯磁率の平均値は低い傾向が認められるが、本論では両試料における帯磁率の傾向を比較するため、ここでは両試料の相関性に着目する。

両試料の決定係数は全ての土質において高く、強い相

関性が認められる。土質ごとに比較すると、礫質土の決定係数が $R^2=0.84$ であるのに対し、砂質土は $R^2=0.88$ 、粘性土は $R^2=0.91$ を示し、粒径が細かいほど高い決定係数が得られている。これは、粒径が細かいほど、標本瓶内に隙間なく試料が充填しやすく、標本瓶試料と調整試料の状態が近くなるためと考えられる。

土質に関わらず、両試料には強い相関性が認められるものの、決定係数を小さくさせる要因としては、上述した「充填具合」「含水状態」が複合的に影響していると仮定した。そこで、次にこれらの要因の影響の程度を個別に検証した。

4. 充填具合や含水状態が測定値に与える影響

(1) 測定試料

測定値の大小により影響の偏りがないことを確認するため、3章で測定した試料のうち、帯磁率が $0.001 \times 10^{-3} \text{SI}$ ~ $10 \times 10^{-3} \text{SI}$ の試料の中から、値の大小が均等に分布するように10試料を選定した。

(2) 検証方法

a) 試料厚さの調整

センサーの透過深度内における試料の充填具合を「厚さ」に置き換えて、標本瓶試料の厚さを8~0.5cmの範囲で段階的に測定した。

b) 含水状態の調整

一般に、水は負の帯磁率を示す反磁性体であることが知られている。そこで、試料内の水分による帯磁率の影響を評価するため、標本瓶試料を用いて乾燥前と乾燥後の帯磁率を比較した。

(3) 検証結果

a) 試料厚さの変化に伴う帯磁率の推移

表-2にセンサーの透過深度にあたる試料厚さ4cmの帯磁率、図-2に試料厚さの調整に伴う帯磁率の推移を示す。

全ての試料において、試料厚さ4cmを基準とした場合、それ以上の厚さにおける帯磁率の変化はほぼ認められない。一方、試料厚を減少させた場合、厚さ2cmでは平均で90%、厚さ1cmでは平均で74%、厚さ0.5cmでは平均で41%の相対値を示す。

表-2 試料厚さ4cmのときの帯磁率

試料名	A	B	C	D	E
土質	有機質土	粘性土	粘性土	粘性土	粘性土
帯磁率 ($\times 10^{-3} \text{SI}$)	0.008	0.008	0.017	0.022	0.067

試料名	F	G	H	I	J
土質	粘性土	粘性土	砂質土	粘性土	砂質土
帯磁率 ($\times 10^{-3} \text{SI}$)	0.233	0.440	1.80	4.41	9.49

b) 含水による帯磁率の影響

図-3のとおり、乾燥前後の帯磁率の決定係数は $R^2=1.00$ で強い相関が認められる。また、乾燥後の帯磁率は乾燥前に比べて0.6%程度の増加を示す。

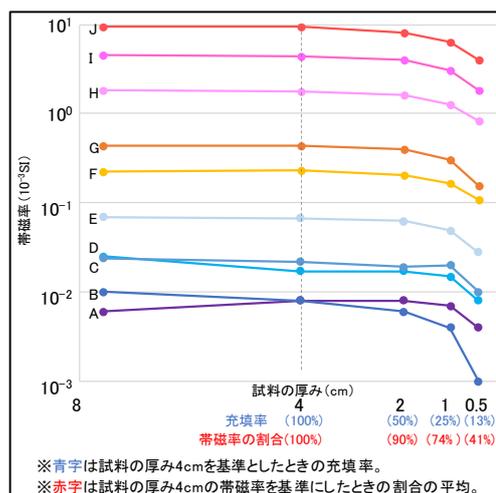


図-2 試料厚さの調整に伴う帯磁率の推移

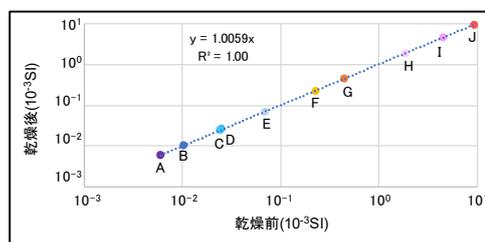


図-3 乾燥による帯磁率の変化

(4) 考察

試料厚さ1~2cmにおける帯磁率の相対値の平均が74%~90%であることは、標本瓶試料に対する調整試料(標本瓶試料に換算すると厚さ1.4cm)の帯磁率が平均約75%である測定結果と矛盾しない。また、センサーの透過深度を下回る厚さでは帯磁率の相対値が減少し、これが測定誤差の一因となる可能性があるため、標本瓶内の試料厚さは4cm以上を確保することが望ましい。

一方で、試料の乾燥前後による帯磁率の変化がほとんど認められなかったことから、含水が測定値に与える影響は非常に小さいと考えられる。

5. まとめ

標本瓶を介した帯磁率測定について、以下の点が明らかになった。

- 標本瓶試料と調整試料の帯磁率は、土質に関わらず強い相関が認められる。
- 試料間の充填具合の差異は帯磁率の精度に影響を与える。ただし、標本瓶内の試料厚さを4cm以上(半分)以上)確保した場合、影響は抑えられる。
- 試料中の含水が測定値に与える影響はほぼない。
- 以上から、標本瓶測定は試料を調整しなくとも、地盤の帯磁率を把握できる有効な手法と言える。

《引用・参考文献》

- 1) Terraplus Inc. (2020):KT-10 and KT-20 Frequently Asked Questions (FAQ), <https://radiationdetection.se/onewebmedia/KT-10%20and%20KT-0%20FAQ.pdf>, (2025年5月12日確認)

ボアホールジャッキ試験機 (KKT) の改良と礫質地盤での適用性

川崎地質株式会社 ○岩井 日菜子, 丸山 祐司, 加藤 猛士, 相澤 穂高, 岳 孝太郎, 平塚 葵

1. はじめに

ボアホールジャッキ試験 (JGS3532-2012) は、孔内載荷試験の一種であり、ボーリング孔壁面に剛体載荷板を等変位載荷方式で加圧し、地盤反力係数や変形係数などを求める試験である。この試験に適用される装置のうち、弊社が開発したKKTシステム(Kawasaki K-value Tester)は、金属製の載荷板を油圧ポンプにより最大20MPaまで加圧可能であるため、主にダムや大深度地下における中硬岩～硬岩を対象に岩盤物性の測定に供されている。

このKKTシステムは、載荷板が金属製であるため載荷圧力が大きいという特徴を有する。しかし、従前のKKTシステムは、圧力・変位がアナログであることや、油圧ポンプが重く油圧ホース等の接続時にはオイル漏れが生じるなど、作業の複雑さに起因する使いにくさなどにより普及が進まず、土質地盤や軟岩ではプレッシャーメーター試験 (JGS1531-2012) が一般的に採用されている。

これらの課題を解決するため、弊社では、ゾンデ～油圧ホース～油圧ポンプの計測システムの軽量化や接続方式の改良、圧力・変位データの収録システムやデータ整理ソフトの製作など改良を徐々に進め、改良型による岩盤以外の土質(礫質)地盤への適用性確認も進めてきた。

2. KKTシステムの改良

(1) KKTシステムの課題

開発当初のKKTシステムは、図-1に示す通り、ゾンデ(当初は炭素鋼製)、油圧ハンドポンプ、スタンドパイプ、圧力指示計、それぞれを連結する油圧ホース(作動油は赤色着色のマシンオイル10番)で構成されていた。構造は単純であるものの、ポンプ(50kg)やゾンデ(20kg)の重量が大きく山岳地や斜面での可搬性に劣り、組み立てにあたっては油圧ホースの脱着時やスタンドパイプのオーバーフロー時に液だれが生じ、都度エア抜きが必要となるほか、バルブ・コック類も多く、煩雑であった。

さらに測定にあたっては、載荷圧を示す「指示計」と変位を示す着色オイルで満たされたスタンドパイプの読み取りにより行う極めてアナログな手法を採用しており、試験者がポンプ操作に集中するあまり、読み取りミスやカウント漏れなどのトラブルを生じやすい構造であった。

(2) KKTシステムの改良経緯

こうした課題を解決するため、平成20年代に入り、載荷圧と変位量のデジタル信号化に着手し、バッテリー駆動により載荷圧をデジタル圧力表示計に、変位量は油の体積のスタンドパイプ読み取りから重量のデジタル荷重計表示に変更し、両者を一体化した計測装置を製作した(図-2)。これらのデータはCFに記録する手法とした。

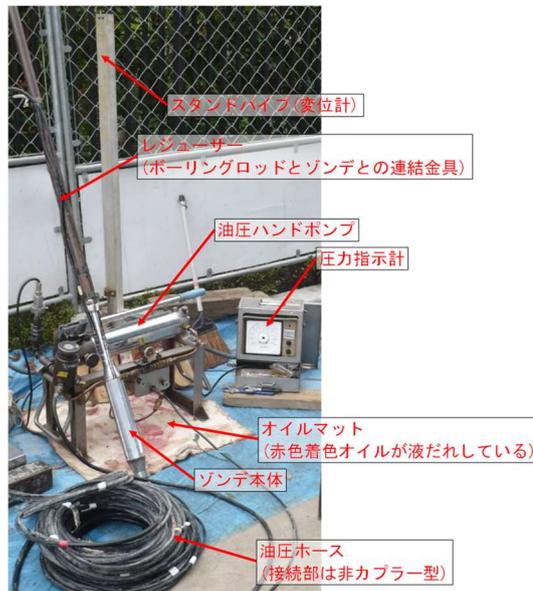


図-1 開発当初のKKTシステム一式外観



図-2 載荷圧・変位量のデジタル表示化

これらの改良により、測定時の試験者の負担は低減したものの、新たに計測装置が加わり、かつポンプやゾンデ、油圧ホース類は従来通りであったため、可搬性などの課題は依然として未解決であり、また作動油は比重が温度により変化することからキャリブレーションを都度要するなど、新たな課題も発生した。

このため、平成20年代後半に、ゾンデ本体・載荷板のアルミニウム化や変位計・圧力計のゾンデ内蔵化、ポンプの小型化・市販品採用、油圧ホースの接続部カブラー化(図-3)などを実施し、令和に入り、データ収録のPC化(ソフト開発・リアルタイムグラフ表示)、ジャイロセンサー対応化が完成し(図-4)、一連の改良が完了した。現行のKKTゾンデのラインナップを表-1に示す。

この結果、KKTは、従来型と比較して可搬性、操作性、作業性、測定精度、速報性が大幅に向上し、解析の効率化やセンサー部のキャリブレーションなどメンテナンス頻度の低減が実現した。

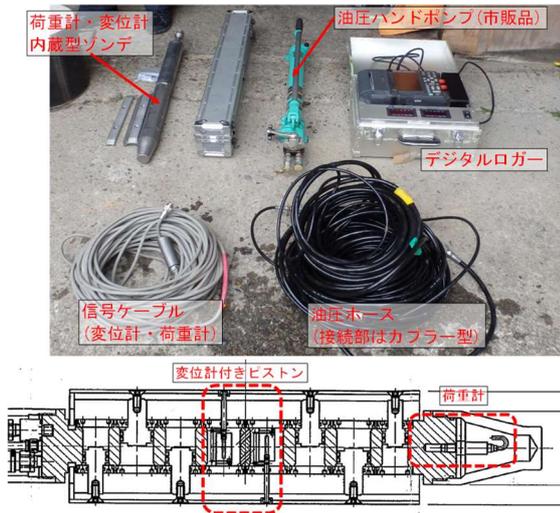


図-3 荷重・変位センサーのゾンデ内蔵化および油圧ポンプ・ホース類の改良状況



図-4 改良(PC収録システム)完成後のKKT測定状況

表-1 センサー内蔵型 KKT 一覧表

用途	岩盤用 (高圧型)	土質地盤用 (標準型)	廃棄物埋立地盤用 (標準型)
外観写真			
外径×長さ	65mm×845mm 65mm×995mm	85mm×1060mm	109mm×1120mm
重量	15kg程度	18kg程度	20kg程度
載荷板 幅×長さ	φ65 30mm×250mm φ75 40mm×250mm φ85 30mm×250mm	φ85のみ 85mm×380mm	φ109のみ 77mm×500mm
載荷角度 β	φ65 27.5° φ75 32.2° φ85 20.7°	φ85のみ 45°	φ109のみ 45°
ストローク	片開き 10mm	両開き 46mm (23mm×2)	両開き 50mm (25mm×2)
最大加圧力	20MPa(高圧載荷)	2500KPa	4500KPa
測定値表示	圧力: 0.1MPa 変位: 0.001mm		

3. 改良型 KKT の土質(礫質)地盤での適用性確認

現在、改良型 KKT は主に岩盤での測定に供しており、その成果については技術フォーラム2024など¹⁾において

も報告している通りであるが、今回は、岩盤部だけでなく土質(礫質)地盤や軟岩地盤に対しても、破損しにくい KKT の特性を生かし測定実績を積むことで、改めて適用性の確認を進めている。本報告では、関東地方の段丘礫層(砂礫地盤・玉石砂礫地盤)や凝灰角礫岩層を対象に変形係数を測定した事例を示す。測定は、同一層の分布深度に対し N 値の大小に関係なく実施した。適用性の評価にあたっては、図-5²⁾に示す地盤工学会による全国の試験データと相関式 ($E=670N^{0.986}$ (kN/m²)) を引用した。

この結果、段丘礫層では、変形係数の分布が縦長となり、相関性は低くなったものの、その分布は経験値のバラつき範囲内に収まり概ね妥当な結果が得られたと考えている。なお、相関性の低さは、層内の玉石・砂礫・マトリックスの不均質性が影響したものと推察される。一方、凝灰角礫岩層の変形係数は、N 値に対し経験値の範囲内でも上限値となるものが多かった。これは、マトリックスが凝灰質粘土で満たされており、段丘礫層と比較し変形しにくいことが影響しているものと推察される。

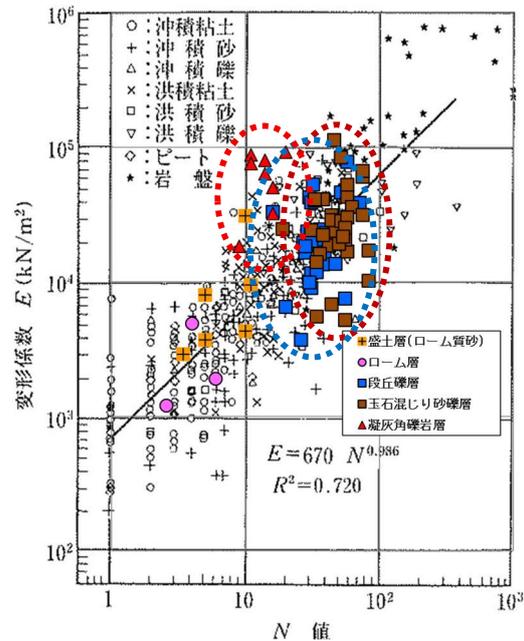


図-5 沖積・洪積地盤における N 値と変形係数の関係²⁾

4. 今後の展望

今後も、改良型 KKT を用いて岩盤部のほか土質地盤でも適用性確認を進め、さらに玉石砂礫地盤での多頻度測定に耐える載荷板の改良や、中圧載荷対応(最大加圧力 10MPa・ストローク 30~40mm 級)装置の開発などを通じ、当手法の土質地盤での普及促進を予定している。

《引用・参考文献》

- 1) 相澤 穂高, 大泉 涼 (2024): ボアホールジャッキ試験を用いた変形係数と初期応力の解析, 全地連技術フォーラム2024, C071. ほか
- 2) 地盤調査の方法と解説 (2013): 公益社団法人地盤工学会, pp. 687. に加筆

電気式コーン貫入試験の摩擦低減法について

株式会社地盤試験所 ○仲 優太朗, 北條 豊, 山本 伊作
中央大学 齋藤 邦夫

1. はじめに

電気式コーン貫入試験（以下、CPT）は地盤特性を連続的かつ経済的にリアルタイムで把握できる試験法である。しかし、時として装置の推力不足により貫入不能となる事もある。推力不足となる主な原因は、硬質層による先端抵抗の急増、もしくはロッドに掛かる周面摩擦の累積などである。

周面摩擦の累積を低減する方法は、一般的にコーン貫入試験器（以下、コーン）先端より 400mm 以上上方¹⁾にロッド径より大きなフリクションカッターを設置し、孔を押し広げつつ貫入する方法である。また、ロッドに設けた穴から泥水または清水を吐出させ、土とロッド間の摩擦を低減して貫入する方法も提案されている²⁾。本実験では、ロッドより清水を吐出させる FL-CPT（フリクションレス CPT）による原位置実験を実施し、周面摩擦低減の程度を検証することを試みた。

2. 実験概要

(1) 原地盤の特性

本実験は、茨城県坂東市菅谷の洪積台地上で実施した。該当地の層序は、GL-1.40m まで盛土、GL-2.50m までローム、GL-4.20m まで凝灰質粘土、GL-5.70m まで礫混じり中砂、GL-7.60m まで砂混じりシルト、GL-11.60m まで細砂～中砂、GL-12.70m まで砂質シルト、GL-24.90m まで中砂～シルト混じり細砂、GL-36.90m まで砂質シルト～シルト、GL-40.50m まで細砂となる。

(2) FL-CPT システム

本調査では、無線 CPT システムを採用した。この無線システムは、コーン内部で測定データを音波に変換し、ロッド内を伝わった音波は、ロッド天端のマイクロフォンで受信、データをデジタル再変換する仕組みとなっている。このため、ロッド内は中空となっており、泥水や清水を通水することが可能である。また、ロッド上端に設置するマイクロフォンは、音波受信およびロッド内への注水を同時に可能とする既製品（図-1）を採用した。1本目のロッドには、フリクションカッターを設置し、吐出孔は清水が下部のコーンに回り込まないように、フリクションカッターの上部にφ16mmの孔を設置した。清水吐出状況を図-1に示す。

(3) 実験方法

本実験では、ポンプで清水を注入する時の注水量を、0ℓ/min（無注入）、1ℓ/min、3ℓ/min、6ℓ/min の4ケースに調整して CPT を実施し、各ケースの距離を2mに設定した。また、CPT の三成分測定に加え、ロッド押込み部に



図-1 注水マイクロフォンと清水吐出状況(6ℓ/min)

ロードセルを設置して貫入推力を測定した。摩擦低減を確認する摩擦力 R は、押込み力 P_0 から先端抵抗力 P_p (= 補正先端抵抗 $q_t \times$ コーン断面積) を差し引いて求めた。

3. 調査結果

実験結果を図-2に示す。補正先端抵抗 q_t 、周面摩擦 f 、間隙水圧 u_2 の測定データに着目すると、ほぼ同じ値を示し、CPT は再現性の高い調査法であることを明示している。また、今回コーン上部のロッドより清水を吐出しているが、吐出水による測定データへの影響は見受けられない。

無注入で実施した通常の CPT では、GL-37.75m で貫入装置押込み力の限界となり、調査を終了した。注水有りのケースでは、流量1ℓ/min では GL-39.65m、流量3ℓ/min では GL-40.56m、流量6ℓ/min では GL-40.58m と流量増加とともに最大貫入深度は増加しており、摩擦低減の効果により調査深度が1.9m～2.8m 増加したことを確認した。ただし、本実験で用意したロッドは40m分であったため、流量3ℓ/min および流量6ℓ/min については、コーン長を加えた調査可能な最大深度で調査を終了している。

図-2の貫入力 P_0 は、先端抵抗力 P_p および摩擦力 R (= $P_0 - P_p$) の結果より、先端抵抗は補正先端抵抗 q_t と単位の違いのみで値の意味は同じであるため、摩擦低減による差はほぼない。貫入力と摩擦力に着目すると、流量の増加とともに両者は減少する傾向が見られる。これは、ロッドからの吐出水により摩擦力が低減され、貫入力が減少している状況を明確に示している。ただし、GL-22.0m 以浅では摩擦低減効果はほとんど見られず、GL-22.0m 以深で摩擦低減効果が得られている。これは、土質の差により摩擦低減効果の程度が変化していることを示す。

図-2の貫入力比および摩擦力比は、無注入時の測定値を1とした時の注入量の比を深度毎に示したものである。この結果より、GL-22.0m の砂層および CPT の土質

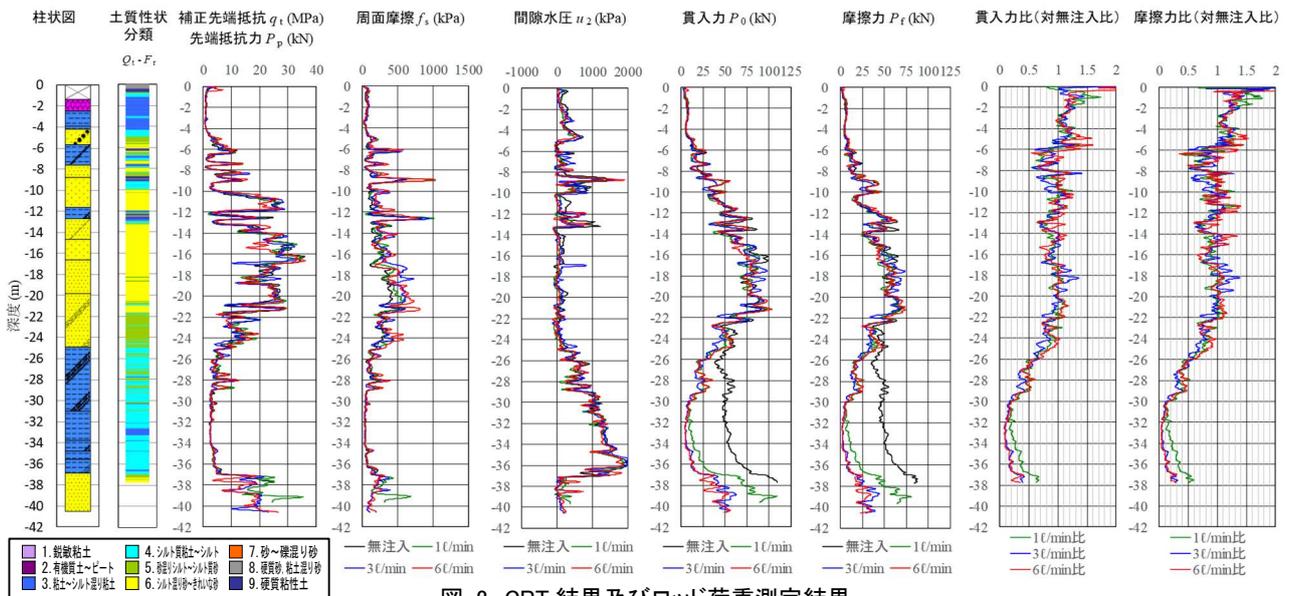


図-2 CPT 結果及びロッド荷重測定結果

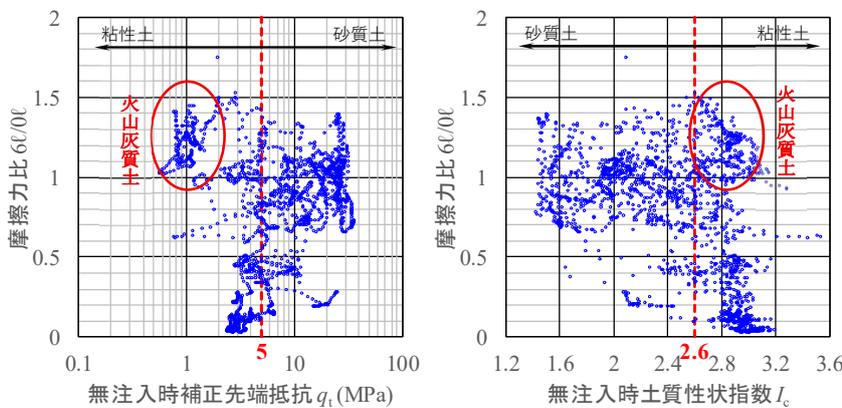


図-3 無水時補正先端抵抗と土質性状指数～摩擦力比

性状分類 SBT=3 (きれいな砂) までは摩擦低減効果は得られず、粘性土および SBT=3~5 (粘土～シルト質砂) では、50%から最大 90%を超える大きな摩擦低減効果を得ている。

補正先端抵抗および土質性状指数¹⁾と 6l/min 時の摩擦力比の関係を図-3 に示す。補正先端抵抗は、一般に 5MPa を境に砂質土と粘性土を区分することができる。また、土質性状指数は $I_c=2.6$ を境に砂質土と粘性土を区分することができる。補正先端抵抗 $q_t > 10\text{MPa}$ の砂質土は、摩擦力比=1 付近に分布し、摩擦低減効果は得られていない。 $q_t=2\sim 4\text{MPa}$ に分布する粘性土は、摩擦力比 0.5 以下の小さな摩擦力比を示し、摩擦低減の効果がよく現れている。しかし、 $q_t=1\text{MPa}$ 付近に分布する粘性土は、摩擦力比=1 付近に分布している。これは、浅層に分布するロームおよび火山灰質粘性土である。土質性状指数 $I_c < 2.6$ に分布する砂質土は、摩擦力比=1 付近に分布し、摩擦低減効果は得られていない。 $I_c > 2.6$ に分布する粘性土は、摩擦力比 0.5 以下に分布するものと 1.0 付近に分布するものと二極化している。摩擦低減効果が得られていないのは、補正先端抵抗と同じく浅層に分布するロームおよび火山灰質粘性土である。この傾向より、注水量

に関わらず、火山灰質土に摩擦低減効果を与えることは難しいことが伺える。また、CPT の簡易な土質分類においては、火山灰質粘性土を粘性土と判定するため、調査地の地盤堆積環境に留意する必要がある。

4. まとめ

今回の実験では、ロッドに掛かる周面摩擦の低減を目的として、ロッド先端部より清水を吐出させて貫入する FL-CPT の効果を確認した。押し込み部のロッドで貫入力を測定し、先端抵抗力を差し引くことで求める摩擦力の低減効果を検討した。この結果、粘性土について50%から最大90%を超える大きな摩擦低減効果を得た。また、砂質土については、あまり摩擦低減の効果は認められなかった。なお、日本の特殊土となるロームや火山灰質粘性土に対する摩擦低減の効果も期待できないことが分かった。

今後は、火山灰質土や砂質土等に対して摩擦低減を行う条件・手法を検討する目的で、FL-CPT を実施していく所存である。

《引用・参考文献》

- 1) 公益社団法人地盤工学会：地盤調査の方法と解説，pp. 366-403，2013年。
- 2) CPT 技術協会：地盤工学の実務におけるコーン貫入試験，2023年，Lunne T., Robertson P.K., Powell J.J.M. (1997): Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice の翻訳

締め固めた土のベーンコーン剪断試験と三軸圧縮試験との強度比較

サンコーコンサルタント株式会社 ○向井 理史, 内田 昇一, 片田 良之

1. はじめに

ベーンコーン剪断試験は、土層強度検査棒の羽根つきコーンを先端に使用して原位置での強度定数を簡便に求めることのできる試験である。試験の整理には経験式による経験式法と、原位置でのベーンコーン剪断試験結果と力学試験結果との相関式を作成して強度定数を求める相関式法の2つが佐々木(2010)¹⁾により提唱されているが、経験式法はデータの蓄積に乏しく暫定的であるため、基本的に相関式法で強度定数を求めることが推奨されているのが現状である。しかし、室内試験を必要としない経験式法は費用面や作業量から実用化が望まれており、これまで矢島ほか(2019)²⁾などによる整理方法の見直し、伊藤(2017)³⁾や佐々木・鈴木(2018)⁴⁾によるベーンコーン剪断試験と室内試験との比較が報告されている。伊藤(2017)³⁾、佐々木・鈴木(2018)⁴⁾は主に砂質土について比較検討し、経験式法の適用にはさらなるデータの蓄積が必要と述べている。今回、粗粒分含有率を変化させた粘性土を対象に力学特性を比較検討し、経験式法の粘性土地盤への適用性について評価した。

2. 試料

(1) 原土

原土は埼玉県比企郡嵐山町内の田園で採取した。室内土質試験の結果、原土は粗粒分含有率10%程度の砂まじり粘土であった(表-1の不攪乱)。

(2) 調整試料

上記の粗粒分含有率10%を含む原土(Case-1)を基準に、市販の5号珪砂を用いて粗粒分含有率を約20%, 30%, 40%にそれぞれ調整した粘性土(Case-2, Case-3, Case-4)を作成した。それぞれの土質性状は表-1に示すとおりである。

表-1 試料の土質性状一覧

	不攪乱	Case-1	Case-2	Case-3	Case-4		
一般	湿潤密度(g/cm ³)	1.688	1.813	1.866	1.904	1.947	
	乾燥密度(g/cm ³)	1.267	1.359	1.436	1.507	1.582	
	土粒子密度(g/cm ³)	2.676	2.648	2.652	2.654	2.646	
	自然含水比(%)	33.2	32.4	29.5	25.5	21.8	
	間隙比	1.115	0.948	0.847	0.762	0.672	
	飽和度	80.2	93.3	93.9	91.9	90.6	
	間隙率	52.72	48.67	45.86	43.25	40.19	
	空気間隙率(%)	10.59	4.65	3.49	4.79	5.72	
	粒度	礫分(%)	0	0	0.3	0.1	0
		砂分(%)	11.7	10.7	21.3	29.1	42.1
細粒分含有率(%)		88.3	89.3	78.4	70.8	57.9	
粗粒分含有率(%)		11.7	10.7	21.6	29.2	42.1	
コンシステンシー	液性限界(%)	54.5	56.8	54.9	52.8	49.9	
	塑性限界(%)	22.8	23.9	23.4	22.6	22	
	塑性指数	31.7	32.9	31.5	30.2	27.9	
	液性指数	0.33	0.26	0.19	0.10	-0.01	
	コンシステンシー指数	0.67	0.74	0.81	0.90	1.01	

3. ベーンコーン剪断試験

(1) 供試体作成方法

今回は異なる土質性状間での力学特性の比較を目的とするため、試験は締め固めエネルギーを統一して作成した供試体で実施した。つまり、締め固め試験用10cm モールドを使用して2.5kg ランマーで25回/1層を3層に分けて突き固めた時($E_c=550\text{kJ/m}^3$)の密度とした。

ベーンコーン剪断試験用の供試体は二つ割れモールド(直径70mm, 高さ150mm)に試料を投入し、ジャッキを用いて供試体の上下方向から圧入して作成した。繰り返しによる強度低下の影響を避けるため、供試体に用いる試料の繰り返し使用は避けることとした。

(2) 試験方法および整理方法

ベーンコーン剪断試験は押し込み荷重と回転トルクから剪断強度(c , ϕ)を求める試験である。具体的な測定方法等や留意点については佐々木(2010)¹⁾で詳述されているため、ここでは省略する。

試験は二つ割れモールドの横方向を固定し、供試体中央部を深さ70mm 程度コアドリルでくり抜いた位置で行った。コーンとロッドの質量を除いた鉛直荷重は0, 25, 50, 75, 100Nとした。

整理は佐々木(2010)¹⁾の経験式(以下、土研式)、矢島ほか(2019)²⁾の回帰式(以下、矢島式)、岸本ほか(2022)⁵⁾の式(以下、岸本式)の3つの換算式を使用した。試験回数については地盤の不均質性から同一地点で4回程度と報告されている。Case-1で4回実施したところ、試験結果に差異は認められなかったため、調整試料は均質に混合されているものと判断し、残りは各1回の試験とした。

(3) 試験結果

試料採取地点での試験結果を表-2に示す。3つの換算式全て1回目の剪断抵抗角は他と比較して高い値となった。

表-2 原位置でのベーンコーン剪断試験結果一覧

	土研式 ¹⁾		矢島式 ²⁾		岸本式 ⁵⁾	
	C_{dk}' (kN/m ²)	ϕ_{dk}' (°)	C_{dk}' (kN/m ²)	ϕ_{dk}' (°)	C (kN/m ²)	ϕ (°)
1回目	7.6	28.0	10.3	12.3	10.3	17.9
2回目	10.4	15.9	14.1	6.7	14.1	13.3
3回目	9.7	14.8	13.1	6.2	13.1	12.8
4回目	7.3	16.9	9.9	7.1	9.9	13.7
平均値	8.8	18.9	11.9	8.1	11.9	14.4

Case-1からCase-4のベーンコーン貫入試験結果を表-3に示す。粗粒分含有率が増加するに従い剪断応力、粘着力は増加する傾向が見られた(図-1, 図-2)。

表-3 調整試料のベーンコーン剪断試験結果一覧

	土研式 ¹⁾		矢島式 ²⁾		岸本式 ⁵⁾	
	C_{dk}' (kN/m ²)	ϕ_{dk}' (°)	C_{dk}' (kN/m ²)	ϕ_{dk}' (°)	C (kN/m ²)	ϕ (°)
Case-1	16.5	26.6	22.3	11.6	22.3	17.4
Case-2	21.1	21.1	28.5	9.0	28.5	17.7
Case-3	26.7	21.5	36.1	9.2	36.1	15.5
Case-4	29.9	40.4	40.5	19.2	40.5	22.2

4. 三軸圧縮試験

(1) 供試体作成方法

供試体は、直径50mm、高さ100mmの二つ割れモールドを使用してCase-1からCase-4までそれぞれ4供試体ずつ作成した。

(2) 試験条件

試験は圧密非排水 (CUbar) の条件とし、有効拘束圧は表層部で実施するベーンコーン剪断試験との比較を検討するため 20, 40, 60, 80kN/m²とした。

(3) 試験結果

試験の結果、表-4に示すと通りの全応力と有効応力が得られた。

表-4 三軸圧縮試験結果一覧

	全応力		有効応力	
	C_{cu} (kN/m ²)	ϕ_{cu} (°)	C'_{cu} (kN/m ²)	ϕ'_{cu} (°)
不攪乱	10.8	21.9	4.0	35.4
Case-1	27.4	24.2	9.2	33.4
Case-2	37.1	22.9	6.6	35.6
Case-3	45.4	24.2	1.9	39.2
Case-4	71.1	25.2	5.5	36.7

5. 考察

(1) 三軸圧縮試験の強度

今回、粘性土の範囲で粗粒分含有率を任意に変えて試験を実施した。その結果、粗粒分含有率にかかわらず有効剪断応力に優位な差は見られず (図-1; グラフは $\sigma = 20\text{kN/m}^2$ としたときの応力)、各ケース間での剪断応力の差は粘着力の差であり (図-1, 図-2, 表-4)、一般的に粘性土で言われていることと整合的であった。

Case-4ではコンシステンシー指数 I_c は1を超え、液性指数 I_L は0未満であることから、粗粒分含有率が40%程度以上では締め固まりやすい特性を持つと言える。図-2のグラフにおいて、全応力のトレンドは粗粒分含有率30~40間で傾きが変わると想定されることから、粗粒分含有率35%で試験を追加し検証することが必要である。

(2) ベーンコーン剪断試験と三軸圧縮試験との強度比較

現段階では、ベーンコーン剪断試験において経験式で求めた剪断応力と三軸圧縮試験でのそれは整合性が見られず、粗粒分含有率の増加とともに両者間の差は大きくなる傾向が認められた (図-1)。従って、今回使用した3つの換算式は室内試験を併用せずに剪断力を求められるため実務で用いられることが多いが、佐々木 (2010)¹⁾や

矢島ほか (2019)²⁾ が指摘しているように、室内試験結果と対応させた相関式を作成することが望ましい結果となった。

また、粘性土を対象にしたベーンコーン剪断試験による経験式での整理は、有効応力ではなく全応力を求めているものと考えられる。

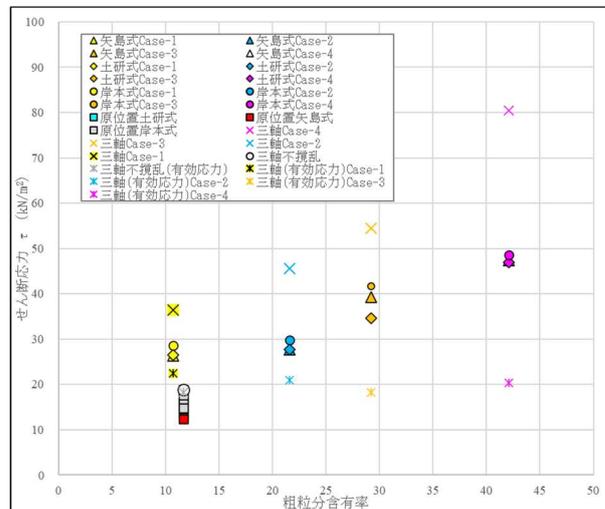


図-1 粗粒分含有率と剪断応力の関係

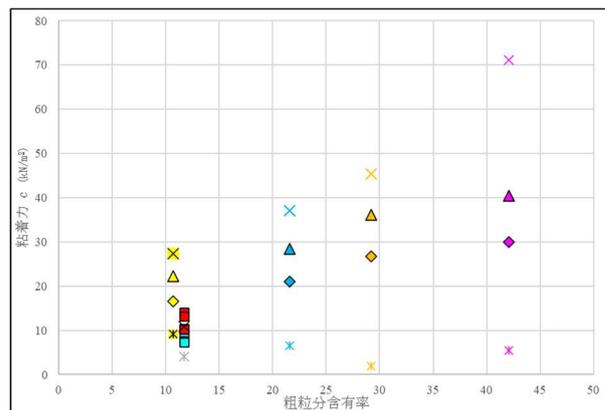


図-2 粗粒分含有率と粘着力の関係

《引用・参考文献》

- 1) 佐々木靖人 (2010) : 土木研究資料「土層強度検査棒による斜面の土層調査マニュアル (案)」, 土木研究所資料 第4176号, p.40.
- 2) 矢島良紀, 山本定雄, 金井哲男, 法水哲, 浅井健一 (2019) : 土層強度検査棒による地盤せん断強度評価に関する考察, 日本応用地質学会研究発表講演要旨, 239-240.
- 3) 伊藤秀一 (2017) : 土層強度検査棒と室内土質試験との比較例, 北海道土質試験協同組合広報誌, 363,5-9.
- 4) 佐々木貴, 鈴木喬之 (2018) : 火山灰質土を対象とした土層強度検査棒と室内土質試験の比較, 全地連「技術フォーラム2018」.
- 5) 岸本秀真, 中尾真, 榎田茂樹, 高橋章 (2022) : 山岳地域における土層強度検査棒の適用性に関する検討 (その2), 電力土木, 422, 37-40.

低流速帯におけるペーパーディスク型流向流速計の適用について

興亜開発株式会社 今野 淳

1. はじめに

近年、地下水の流動調査に関しては、地下水・土壌汚染問題、建設工事に伴う流動阻害や井戸枯れ問題など、地下水の流向流速の把握が重要視されている。原位置において地下水の流向流速を測定する手法としては、多孔法と単孔法がある。経済的な理由と、時間が比較的短いという理由から単孔法で流向流速を把握したい需要が存在している。

単孔法の測定で使用されていた熱量法式流向流速計（以下熱量式装置）だが、既に生産を終了しており日本で稼働している機械も希少になり確保が難しくなっている現状がある。

代替となる流向流速計を探す中で、熱量式装置との関連情報があった大起理化学工業製の「ペーパーディスク型簡易地下水流向流速計（以下ペーパー式装置）」の検討を行うこととした。

今回検討を行う中で、過去の案件で既存井戸での流向流速測定が多く、また井戸洗浄を行っても流速が非常に遅い条件などがあったため、低流速でも測定が可能かを目的に実験を行った。

2. 調査方法

今回の検討において、熱量式装置を使用した測定と、ペーパー式装置を使用した測定を行い、その相関を求めた。それぞれの原理と測定方法について述べる。

(1) 熱量式装置

測定器に内蔵したヒータにより地下水を温め、測定器の円周上に設置された温度センサにて地下水の温度を観測し、各温度センサの経時変化から流向と流速を求めるものである¹⁾。

図-1 に熱量法による測定器のプロープモード断面図を示す。

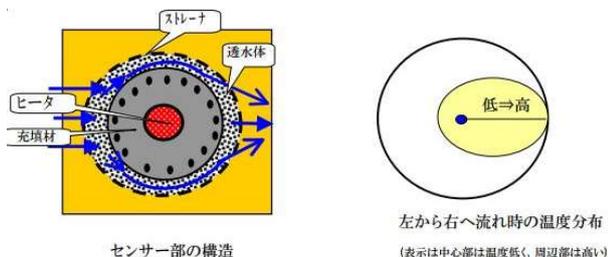


図-1 熱量法による測定器のプロープモード断面図

地下水の流れがない時に中心ヒータに電圧を加えると、発生した熱は周囲に均等に拡散して中心部から外側へ同心円状に温度分布が形成される。流れがある場合、発生

熱は地下水の流れに乗って下流方向に移流する。そのため、下流方向に配置されたセンサは、上流側に配置された温度計よりも高い温度を示すことになる。

ヒータ周辺に配置された温度計の加電前と加電後の温度の差は、地下水流速が遅いほど大きく、速いほど小さくなる。よって温度差の大小で流速を求めることができる。以上より、ヒータの周囲とその周りに配置された温度計の数値を測定し、その温度の違いを知ることで地下水の流動方向と流速値に関する情報を得ることが可能となる。

(2) ペーパー式装置

本装置の基礎原理は紙上に印刷されたドットから溶出した染料インクが透水体内を移動する水によって輸送されることを利用したものである。インクの軌跡（テーリング）を画像解析して地下水流向流速を求める。²⁾ 図-2 に単ドット式ペーパーディスクモード図を示す。

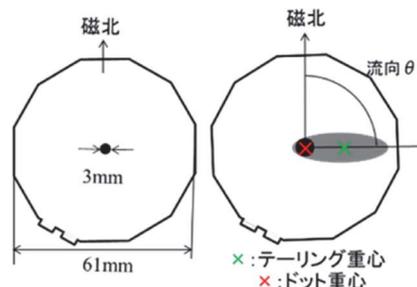


図-2 単ドット式ペーパーディスクモード図

流向流速の解析は目視による解析と、画像解析ソフトを用いた解析の二種類がある。目視による解析は現地ですぐに結果が求められるという利点があるが、流速が0.3cm/min以下になると測定誤差が50%を超えるという報告があり³⁾今回は目視による解析と、ソフトを用いた解析でそれぞれの相関比較をすることとした。

測定したペーパーディスクを乾燥後、スキャナを用いて電子化する。スキャナの種類はメーカーにより指定されておりヒストグラム調整などが必要となる。今回は画像ソフトを使い同様の状況を再現した。

電子化した画像はメーカーにより指定されているオープンソースの画像解析ソフトImage J及び専用マクロを用いて処理を行う。図-3 にテーリングの画像処理過程を、図-4 に解析項目のイメージ図を示す。

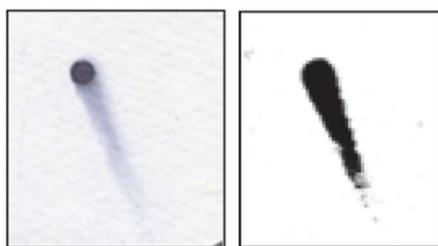


図-3 画像処理過程 (左: 処理前 右: 処理後)

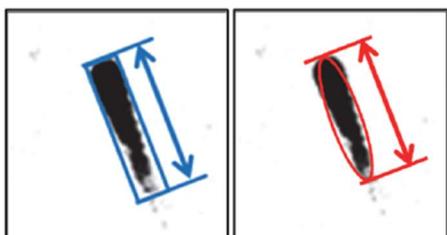


図-4 解析項目のイメージ図 (左: フェレ径 (方向解析) 右: 楕円体近似長径 (流速解析))

3.調査結果

今回の調査は、井戸洗浄済みの観測井を利用し、熱量式装置とペーパー式装置で結果を求める事とした。

対象とした井戸のストレーナ層には砂層とシルト混じりの砂層があり、深度により透水係数に差があった。それぞれの深度での相関性を求めた。

砂層における熱量式装置を用いた結果を図-5に、ペーパー式装置を用いた結果を図-6に示す。



図-5 熱量法式測定結果(シルト混じり砂層)

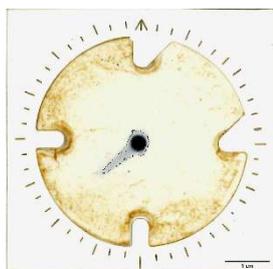


図-6 ペーパー式測定結果(シルト混じり砂層)

ペーパー式装置の結果のうち目視による計算はノギスにより長さを求め、ソフトを使用した解析、熱量式装置の結果をまとめたものを表-1に示す。

表-1 結果比較一覧

	流速(cm/min)	流向 (°)
ペーパー式目視換算	0.052	120
ペーパー式画像解析	0.024	106.2
熱量法解析	0.025	138.5

	流速(cm/min)	流向 (°)
ペーパー式目視換算	0.36	170
ペーパー式画像解析	0.020	177.8
熱量法解析	0.019	175.1

	流速(cm/min)	流向 (°)
ペーパー式目視換算	0.038	230
ペーパー式画像解析	0.023	224.6
熱量法解析	0.026	204.6

熱量法の結果とペーパー式の結果を比較すると、画像解析を行った結果と熱量法式の結果では相関がとれていた。しかし目視による長さの測定からの換算では差が見られる地点もあった。このことから目視による現地での測定には課題があっても、ソフトを使用した画像解析を行うことにより相関性のある結果が求められることができた。

4. まとめ

今回の実験は、ペーパー式装置と熱量法式装置の相関を求めることを目的とした。

結果によると低速の流速において目視での測定に問題があった地点も、ソフトウェアを使用した画像解析ソフトを用いた結果では熱量法式の結果と相関性が見られた。そのため流速の遅い地点でも画像解析ソフトを用いて相関を求めることが可能であるという結果が得られた。

課題として深い深度(GL-8m 以深)での測定を行うと、組み立てながら装置を差し込む都合上、インクが滲む、逆方向にもインクが示すなどが起こった。深い深度の測定では課題が残った。



図-7 ペーパー式測定結果(失敗例)

《引用・参考文献》

- 1) 単一調査孔を用いた地下水流動計測プローブの開発 P195 武田 浩 (2007 年)
- 2) 単ドット式ペーパーディスク型地下水流向流速計の開発 山本浩一 (2015年) <https://www.jma.go.jp/jma/index.html>
- 3) 電源不要かつ迅速な地下水流向流速計測方法の開発 山本浩一 (2016年)