

CPT システムを利用した土壌固有熱抵抗測定器の有効性の検証

応用地質株式会社 ○山田 拓, 正岡 裕之, 平出 亜
中電技術コンサルタント株式会社 白井 秀幸

1. 土壌固有熱抵抗測定の実験と課題

洋上風力発電事業において、地中に埋設するケーブルの許容電流を設定することを目的として、海底地盤の土壌固有熱抵抗値 g ($^{\circ}\text{C}/\text{cm} \cdot \text{W}$) の測定が行われている。

海底地盤の土壌固有熱抵抗値 g を直接測定する方法としては潜水士が海底地盤面に測定棒(この測定器を従来器と称する)を設置して測定する方法や調査船から着座式の専用機器を海底地盤に設置して測定する方法がある。しかしながら前者は潜水作業に危険が伴うこと、後者は装置が大がかりとなり水深 10m 以下の浅海域に調査船が進入できないなどの課題があった。

2. 浅海域における土壌固有熱抵抗測定器の開発

上記の課題解決のために、浅い海域（水深10m以下）を対象としてSEP 船に搭載したダイレクトプッシュ方式の電気式コーン貫入試験（以下、CPT）を利用した土壌固有熱抵抗測定棒（新型器、 $\Phi 36.0\text{mm}$ ）を開発した（図-1）。

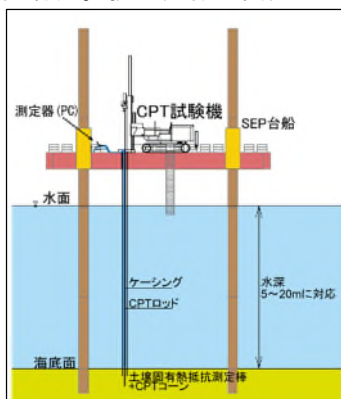


図-1 新型器による土壌固有熱抵抗(g)測定イメージ

3. 新型器の概要

新型器は従来器と同様に、直流電源装置、データロガーおよび測定棒（探針）で構成される（図-2）。探針は地盤面から2m 程度までの土層を対象とし、（財）電力中央研究所報告¹⁾に準拠して探針の長さを直径の20倍以上、下端測定点から探針端部までの長さを直径の10倍以上としている。なお、地盤面から深度0.8m, 1.2m, 1.6m の位置に T 型熱電対を取り付けていて、3深度の温度を測定できる構造²⁾である。また、従来器と新型器の違いについて表-1にまとめた。

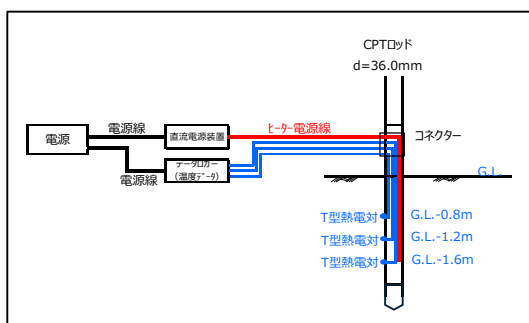


図-2 土壌固有熱抵抗測定器の概要(新型器)

表-1 従来器と新型器の違い

項目	従来器	新型器
直径	21.7mm	36.0mm
材質	ステンレス	鋼材
測定時間	2時間	2時間

4. 従来器と新型器及び室内試験の測定結果の比較

(1) 比較実験の概要

新型器の有効性を検証するために、陸上の試験ヤードにて従来器により得られた測定結果との比較実験を行った。また、熱電対最上部の深度に合わせて試料採取を行い、室内試験にて熱伝導率測定を行った。なお、比較実験では従来器が貫入予定深度の10cm上で高止まりしたため、新型器・従来器とも地盤面から深度0.7m, 1.1m, 1.5mで測定を行った。

試験値の分布地質は、図-3に示すように細砂で構成されている。物理試験結果から含水比6.0%と低く、湿润密度 1.56Mg/m^3 と非常に緩い砂となる。

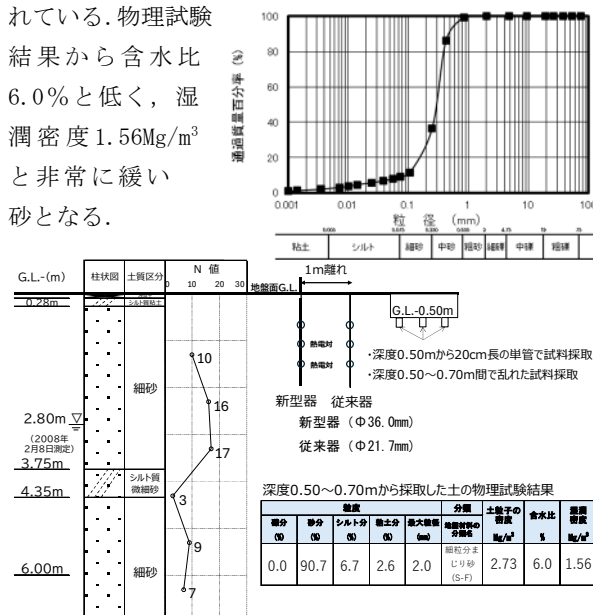


図-3 試験地の地盤情報

(2) 測定方法

測定は試験地の3箇所(No.1~No.3)で行い、新型器と従来器の試験地点の間隔は1mとして、互いの地中内温度の影響が出ることを避けるため、測定日を変えて行った(図-4)。なお、従来器と新型器では探針の挿入方法が異なる。従来器はドリルで先行して穴をあけ、そこに探針を挿入し、ハンマーで探針上部をたたくことで所定深度まで挿入させた。一方、新型器はCPTを利用した測定器であるため、CPTマシンを用いて押し込むことで所定深度までの挿入を行った。

また、室内試験に供する試料は、新型器で測定した

No.1地点の近傍にて深度0.50m から20cm 長の単管によって採取した乱れの少ない試料（CPT 機で圧入）と、深度0.50～0.70m 間で採取した攪乱試料を用いた。攪乱試料については密度調整を実施したうえで熱伝導率測定を行った。

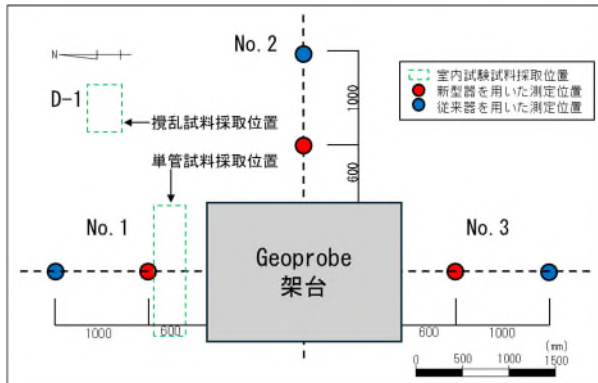


図-4 比較実験の位置関係

(3) 測定結果

従来器と新型器から得られた土壌固有熱抵抗 g の測定結果及び熱伝導率測定から得られた土壌固有熱抵抗 g を表-2に示した。なお、熱伝導率測定から得られた熱伝導率 λ ($W/m \cdot K$) は関係式 (1) を用いて土壌固有熱抵抗値 g に変換した。

$$g = 100 / \lambda \quad (1)$$

その結果、従来器及び新型器から得られた値は一部のデータを除き、普通地の土壌固有熱抵抗値 100 ($^{\circ}C \cdot cm/W$) に近い値を示し、室内での熱伝導率測定から得られた値は乱れの少ない試料で 119 ($^{\circ}C \cdot cm/W$)、密度調整試料で 102 ($^{\circ}C \cdot cm/W$) の値を示し、ほぼ同じ値が得られた。

表-2 土壌固有熱抵抗測定結果

測定箇所	測定深度 (GL-m)	従来器	新型器	室内試験				備考	
		土壌固有熱抵抗値 g (°C・cm/W)	供試体 No.	状態	プローブ 挿入方向	土壌固有熱抵抗値 g (°C・cm/W)			
D-1	0.5～0.7	—	—	1	密度調整	—	96.2	密度調整試料平均値 102.3	
		—	—	2			108.7		
		—	—	3			102.0		
No.1	0.7	100.1	102.8	4	乱れの少ない 試料	上部 下部 上部 下部	91.7 142.9 108.7 129.9	乱れの少ない試料平均値 全体：120.2 上部：105.1 下部：135.4	
				5			上部 下部		114.9 133.3
				6			上部 下部		101.6 89.0
				7			上部 下部		146.7 108.1
	1.1	91.7	103.9	—	—	—	—	—	
	1.5	101.6	89.0	—	—	—	—	—	
	No.2	0.7	146.7	108.1	—	—	—	—	従来器過大値
		1.1	119.9	102.5	—	—	—	—	—
1.5		114.0	86.3	—	—	—	—	—	
No.3	0.7	108.3	232.8	—	—	—	—	新型器過大値	
	1.1	103.5	101.0	—	—	—	—	—	
	1.5	104.6	82.2	—	—	—	—	—	

5. 考察

比較実験の結果から、従来器と新型器から得られた土壌固有熱抵抗値 g は概ね一致するか、新型器の値が従来器の値の75～85%程度の値を示す結果となった（図-5）。なお、従来器と新型器によって得られた値で乖離が認められたデータについては、温度と時間の関係から明らかに土質が異なる傾向を示しており、細粒分含有率や含水比などの違いによるものと考えられた。また、新型器と従来器の測定結果を比較すると（図-6）、新型器

のデータは温度が上昇するのに時間がかかっているものの、同様な測定時間で従来器と相違ないデータが得られていることが確認された。

熱伝導率測定結果については、乱れの少ない試料と密度調整試料での測定結果に差異が生じており、密度調整試料での測定値の方が、探針による測定値と近い値を示す結果となった。これは、密度調整試料の方が乱れの影響等を受けず、現地盤の状態を再現した状態で測定を行うことができたためであると考えられる。

以上から従来器と新型器の違い、すなわち材質と直径の違いによる影響は少ないことが確認できた。

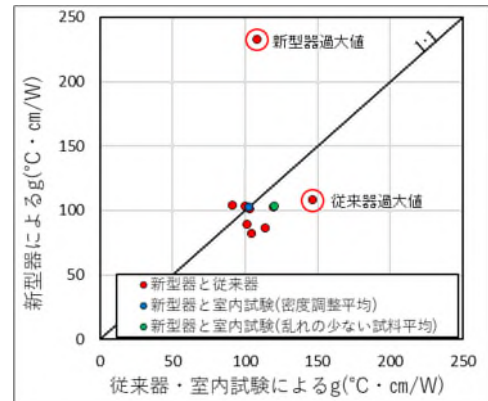


図-5 新型器と従来器・室内試験による g の比較

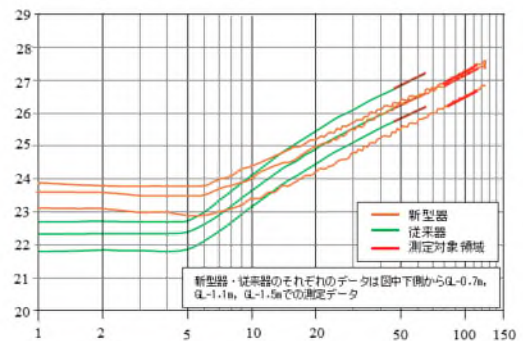


図-6 新型器と従来器の測定結果例の重ね合わせ(No.1)

6. 今後の展望

比較実験により、新型器の有効性を検証することができた。新型器を作成した目的である海底地盤を対象とした土壌固有熱抵抗値 g の測定にも取り組んでいく方針である。

《引用・参考文献》

- 1) 一般財団法人 電力中央研究所:深部土壌の固有熱抵抗測定法, 電力中央研究所研究報告183030, 1984.
- 2) 正岡裕之・平出亜・山田拓: CPT システムを利用した土壌固有熱抵抗測定器の開発, 第60回地盤工学研究発表会論文報告集, 2025.
- 3) 一般社団法人 日本電線工業会: 66kV 以上電力ケーブルの許容電流計算 JCS0501: 2022, 2022年10月改正, p54.
- 4) Hukseflux Thermal Sensors: TP08 manual v1009.