

電気式コーン貫入試験システムの開発と比較検証試験の結果

コーン貫入試験 試験装置 規準

 (株)地盤試験所 正○佐藤行平
 仲優太郎
 国 亀井秀一
 金沢大学 国 松本樹典

 正 北條豊
 正 山本伊作
 国 林世峻

1. はじめに

電気式コーン貫入試験（以下、CPTU）は、地盤工学会基準 JGS-1435¹⁾に規定されたサウンディングである。2012年の改正では、コーン先端抵抗 q_c と間隙水圧 u の二成分を測定する基準から、ISO に準じて周面摩擦抵抗 f_s を加えた三成分を測定する基準となり、比較的新しい調査方法とも言える。国内においては膨大な現場経験を背景に、標準貫入試験と室内試験を併用する調査法が一般的であるが、最近では洋上風力基礎地盤、河川堤防、軟弱地盤、直接基礎等の調査で CPTU の用途は広がりつつある。しかし、CPTU システムは 1960 年代より開発が進んでいる欧米製品の利用が多く、基準に則った維持管理のためにはコーンをメーカーで校正する必要がある。海外発送時に使用できない時間ロスと維持管理の両面で負担が大きいことが、国内で CPTU の普及が進まない要因にもなっている。このような背景から、(株)地盤試験所は CPTU システムの開発を行った。本稿では、開発・製造の経緯と比較検証試験を行った結果を報告する。

2. CPTU システムの開発・製造

CPTU システムを開発するに当たり、最初に検討したのは貫入試験器本体、先端コーンおよび周面スリーブの材質である。普通鋼で試作した貫入試験器を地盤に貫入させたところ、 N 値 20 程度の砂層でかなり大きく損傷し、とても採用できる材質ではなかった。その後、複数のステンレス鋼で試作・確認し、最終的に析出硬化系ステンレス鋼を採用した。

貫入試験器に各種センサーを設置し、50m~100m の長いケーブルを用いたアナログ測定を行った場合、測定値はケーブルによる電圧減衰や温度の影響を受け、測定値の精度に問題が生じる。この対策として、貫入試験器内部に A/D 変換ボードを設置し、測定データの通信をデジタル化することで、ケーブルの電気抵抗や温度の影響を除去する仕様とした。ただし、貫入試験器本体の温度影響を完全に除去するのは困難であるため、各センサーの温度補正が可能となるよう、貫入試験器内部に温度計を設置した。また、調査中の急激な孔曲がりの検知および調査深度の鉛直深度補正のために、二軸の傾斜計を設置した。

コーンからのケーブルを接続するインターフェースは、PC と USB 接続した際に、PC から電源を供給できる仕様とした。また、別途 100V の電源供給が必要となるが、インターフェースと PC は Bluetooth による無線接続も可能である。インターフェース内部には GPS を内蔵し、調査地点の位置情報を取得することができる。

コーンの形状は基準に準じて製造した。コーンの形状を表-1 に示し、各センサーの容量を表-2 に示す。

表-1 貫入試験器の基準と開発コーンの形状

コーンの仕様			許容範囲・規格	開発コーン
先端 コーン	先端角	°	60±5	60.0
	コーン直径	d_c mm	$35.3 \leq d_c \leq 36.0$	35.7
	コーン断面積	A_c mm ²	1000	1001.0
	シャフト直径	mm		31.1
	シャフト断面積	A_n mm ²		759.6
	有効面積比 ^{※1}	a	$a = 0.5 \sim 0.9$ $a = A_n/A_c$	0.76
	円錐部高さ	h_c mm	$24.0\text{mm} \leq h_c \leq 31.2\text{mm}$	31.2
	円柱延長部の高さ	h_e mm	$7.0\text{mm} \leq h_e \leq 10.0\text{mm}$	9.0
周面 スリーブ	直径	d_2 mm	$d_c \leq d_2 < d_c + 0.35\text{mm}$ かつ $d_2 < 36.1\text{mm}$	35.9
	長さ	l_s mm	$132.5\text{mm} < l_s \leq 135.0\text{mm}$	133.0
	表面積	A_s mm ²	15000	15000.2
	底部断面積	A_{sb} mm ²		5.3
	頭部断面積	A_{st} mm ²		5.3
フィルターの直径	d_{fil} mm	$d_2 - 0.2 \leq d_{fil} < d_2$ かつ $d_c \leq d_{fil} < d_c + 0.2\text{mm}$	35.8	

※1…データ整理時に使用する有効面積比 a は間隙水圧のキャリブレーションチャンバー試験から求める。

表-2 各センサーの容量

センサー	先端抵抗 q_c	周面摩擦 f_s	間隙水圧 u	傾斜角（二軸） β	温度
容量	50.0 MPa	1.0 MPa	5.0 MPa	±10°	-10°C ~ +80°C

3. 比較検証試験

製造した CPTU システムと既存の海外製 A 社システムの比較検証試験を茨城県坂東市菅谷地先で行った。A 社と開発コーンの試験位置は 5m 離れて実施した。CPTU の測定結果および規準化先端抵抗 Q_t ~ 規準化周面摩擦比 F_r 関係²⁾から求めた土質性状分類結果を SPT からの柱状図と合わせて図-1 に示す。SPT からの調査地の層序は、表層 1.60m まで盛土、GL-2.85m までローム、GL-4.80m まで粘土質ローム、GL-5.95m まで粘土混じり中細砂、GL-7.10m まで凝灰質粘土、GL-8.00m まで砂質粘土、GL-9.80m まで砂混りシルト、GL-12.50m まで細砂、GL-13.00m までシルトとなっている。

CPTU の土質分類では、GL-4.80m までのローム層は、A 社および開発コーンともに低い補正コーン先端抵抗 q_t と高い間隙水圧 u を示し、粘土と判定された。調査地点の地下水位は GL-2.9m にあり、GL-2.9m 以浅の間隙水圧の上昇は含水に由来するものとする。GL-5.95m までの粘土混じり中細砂層は、A 社および開発コーンともに高い q_t と低い u を示し、砂と判定された。A 社位置では砂層は 0.7m 程度深くまで分布する。GL-7.10m までの凝灰質粘土層は粘性土と判定された。GL-8.00m までの砂質粘土と GL-9.80m までの砂混りシルト層は、両地点でかなり複雑な互層分布を示す。間隙水圧 u の分布では、 $u=0$ 付近となる排水層を砂層、静水圧より大きくなる層を粘性土と判断することができ²⁾、この区間の SPT からの土質分類と同様な結果となっている。GL-13.00m までのシルト層はシルト層と判定された。CPTU では 20mm 毎のデータ収集、解析（土質分類）により、ボーリングの標準 1.0m 間隔の採取土試料（長さ 0.3m）の目視判定と比べて詳細に地盤情報を得ることができる。

補正コーン先端抵抗 q_t と周面摩擦抵抗 f_s の測定結果は、小さな測定値を見やすくするため、対数で表示した。既存 A 社と開発コーンの測定データは共に、砂質土層では大きな補正先端抵抗値および小さな間隙水圧値となり、粘性土層では小さな先端抵抗値と大きな間隙水圧値を得ている。また、両者ともに概ね同等な値を得ていることから、開発した CPTU システムの適用性を確認することができた。

4. おわりに

新しく設計・製造した CPTU システムは、現場で採用できるレベルのシステムであることを確認した。今後はサイズミック試験（板叩き法速度検層）を可能とするジオフォンを内蔵した貫入試験器へのアップデートを検討する予定である。

本開発は、東京都「第二回 躍進的な事業推進のための設備投資支援事業」の支援を受けたものである。この場を借りて深く謝意を表す。

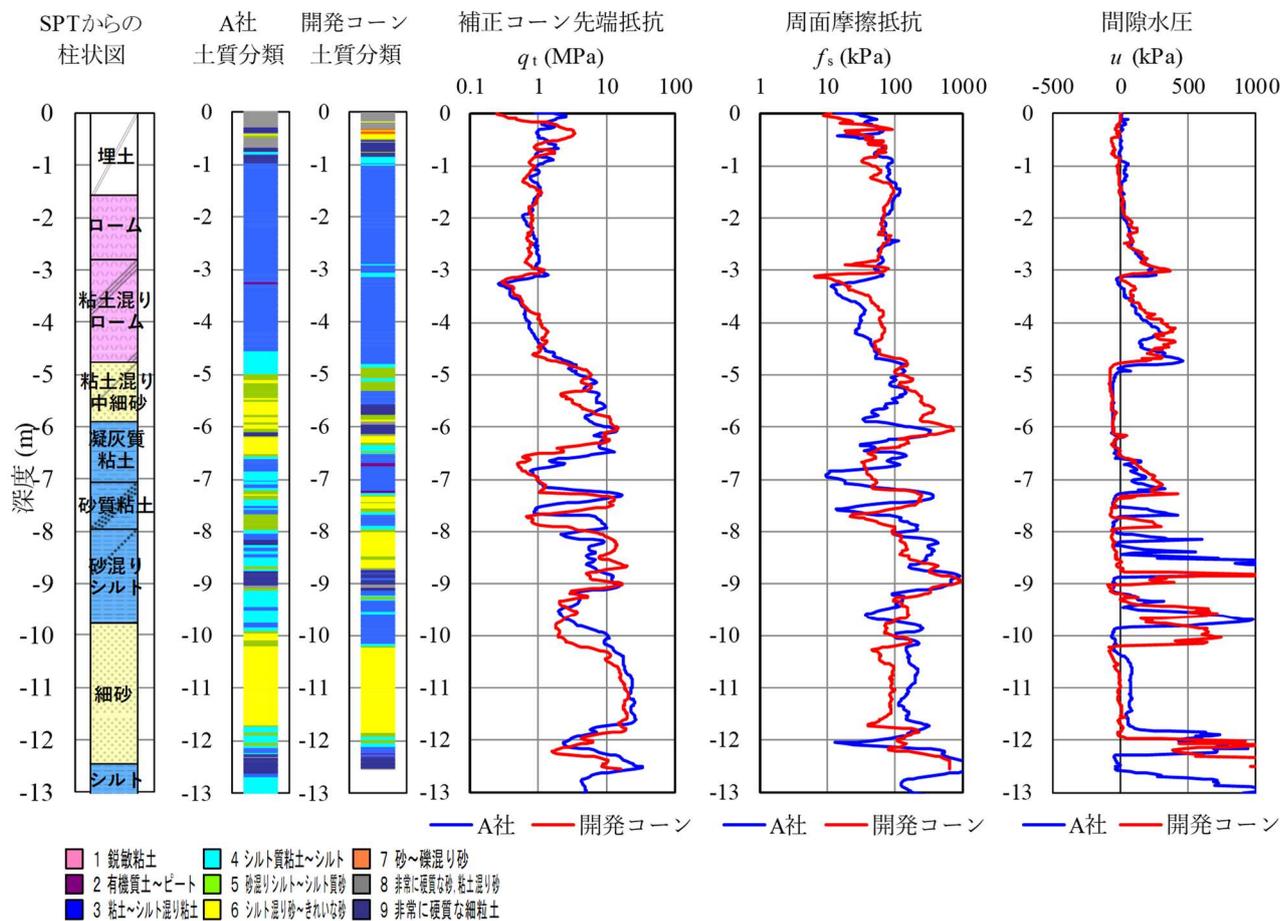


図-1 既存測定システムと開発測定システムの調査結果比較

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