

平成 28 年度「新マーケット創出・提案型事業」

電気式コーン貫入試験による斜め方向地盤調査

研究成果論文集

平成 30 年 3 月

電気式コーン貫入試験による斜め方向地盤調査研究会

研究会参加企業（20社）

	会社名
幹事会社	株式会社地盤試験所
コア企業 (CPT 技術協会)	川崎地質株式会社
	ソイルアンドロックエンジニアリング株式会社
	株式会社タカラエンジニアリング
	千葉エンジニアリング株式会社
	株式会社日さく
	中央開発株式会社
	興亜開発株式会社
	株式会社ダイエーコンサルタンツ
	株式会社地圏総合コンサルタント
賛助企業	株式会社アサノ大成基礎
	基礎地盤コンサルタンツ株式会社
	株式会社相愛
	株式会社ダイヤコンサルタント
	大和探査技術株式会社
	株式会社地球科学総合研究所
	東邦地下工機株式会社
	日本物理探査株式会社
	株式会社ブラテック
	北海道土質試験協同組合
アドバイザー	齋藤邦夫 中央大学理工学部都市環境学科
	深沢健 日揮株式会社

WG 名簿

現場 WG	主査	北條 豊	株式会社 地盤試験所
		高橋 千代丸	株式会社 地盤試験所
		山本 伊作	株式会社 地盤試験所
		橘 久生	興亜開発 株式会社
		鳥越 崇	興亜開発 株式会社
		重富 正幸	ソイルアンドロックエンジニアリング 株式会社
		松浦 良信	ソイルアンドロックエンジニアリング 株式会社
		長澤 遼	ソイルアンドロックエンジニアリング 株式会社
		野口浩承	株式会社 地圏総合コンサルタント
		相澤 明宏	株式会社 地圏総合コンサルタント
		若月 洋朗	千葉エンジニアリング 株式会社
		西原 聡	中央開発 株式会社
		栗原 朋之	中央開発 株式会社
		岸 孝司	株式会社 相愛
		太田 雅之	株式会社 ダイヤコンサルタント
		片山 浩明	東邦地下工機 株式会社
		加藤 秀和	東邦地下工機 株式会社
		岡嶋 眞一	日本物理探鉱 株式会社
		日下部 祐基	株式会社 プラテック
		中川 範彦	北海道土質試験協同組合
普及 WG	主査	黛 廣志	川崎地質 株式会社
		小林 優起	川崎地質 株式会社
		大塚 潤	株式会社 タカラエンジニアリング
		網代 稔	株式会社 ダイエーコンサルタンツ
		久下 信明	株式会社 ダイエーコンサルタンツ
		佐渡 耕一郎	株式会社 地圏総合コンサルタント
		中川 清森	株式会社 地圏総合コンサルタント
		大森 将樹	株式会社 アサノ大成基礎エンジニアリング
		武政 学	基礎地盤コンサルタンツ 株式会社
		糸井 理樹	大和探査技術 株式会社
		原 彰男	株式会社 地球科学総合研究所
積算 WG	主査	後藤 政昭	ソイルアンドロックエンジニアリング 株式会社
		石井 正紀	ソイルアンドロックエンジニアリング 株式会社
		金道 繁紀	株式会社 地盤試験所
		岡 信太郎	株式会社 地盤試験所
		脇中 康太	川崎地質 株式会社
		佐藤 紘一	川崎地質 株式会社
		石川 恵司	株式会社 日さく

本研究会の目的

我が国の社会資本ストックは、高度経済成長期などに集中的に整備され、今後急速な老朽化が懸念されている。今後は、これらを効果的かつ効率的に点検・維持管理・更新していくことが要求されており、また、こうした土構造物に対しても同様である。

電気式コーン貫入試験（以降、CPTU と記す）は、ボーリング調査に比べ迅速、かつ原位置にて力学・物理特性を把握することができ、土構造物の現状調査を実施する上で有効な手段である。また、CPTU の調査データはデジタルデータとして利用・管理されることから、ICT の情報活用に適した調査である。

道路・鉄道として供用中の河川堤防や盛土などで調査を行う場合、現場は通行規制や夜間作業などの制限が発生する。このような状況で地盤調査を行う場合、斜面法面や盛土小段などから斜めに CPTU を実施して地盤を評価できれば様々な作業制限を除去できるだけでなく、CPTU の活用場面が広がるものと考えられる。

本研究会では斜め CPTU 調査方法の測定精度と解釈の検証を行い、CPTU による斜め方向の地盤調査手法を確立するとともに、適用範囲を明らかにする。

事業内容

(1) 適用性の検討

- ・ 現場実験を行い、CPTU による斜め方向地盤調査の適用対象、適用限界について検討する。
- ・ 対象とする土質は沖積粘性土、沖積砂質土、関東ローム等とする。

(2) 積算資料作成

- ・ 斜め CPTU 普及のため、現場実験結果や参加企業による試用結果をふまえ積算資料を作成する。

(3) 普及活動

- ・ 斜め CPTU 普及のため、リーフレット等の営業資料を作成する。

(4) その他

- ・ 参加企業間の情報交換並びに現場実験により、斜め CPTU の測定方法、測定精度について検討する。

研究成果論文集

I. 第14回地盤工学会関東支部発表会（4編）

2017/11/17 栃木県総合文化センター（栃木県宇都宮市）

P5～
電気式コーン貫入試験の斜め下方貫入への試み（その1：実証実験概要）
株式会社 地盤試験所 北條 豊
電気式コーン貫入試験（以降、CPTU と記す）は、ボーリング調査に比べ迅速、かつ原位置にて力学・物理特性を把握することができ、地盤調査を実施する上で有効な手段である。ただし、貫入方法や結果の解釈は鉛直貫入が前提である。CPTU の斜め貫入が可能となれば、盛土の法肩や盛土小段からの調査あるいは橋脚間地盤の状況調査など、その活用範囲は格段に広がるものと考ええる。 本実験では、鉛直および斜め方向（鉛直 90 度、75 度、60 度、45 度）の CPTU を実施し、ボーリング調査や室内土質試験結果と比較するとともに、各角度の CPTU 結果についても比較検証を行った。 本稿（その1）では、実験調査の概要について報告する。
P9～
電気式コーン貫入試験の斜め下方貫入への試み（その2：貫入方法や所要時間等について）
ソイルアンドロックエンジニアリング 株式会社 石井 正紀
本稿（その2）では、斜め下方貫入に必要な治具、スクリューアンカーの設置方法などを紹介する。加えて、通常の鉛直(90度)貫入に対して 75 度、60 度、45 度で斜め下方に貫入した場合のスクリューアンカー設置等の所要時間や試験の所要時間、設定角度と実測角度の差違等についても報告する。
P12～
電気式コーン貫入試験の斜め下方貫入への試み（その3：電気式コーン貫入試験結果の評価）
株式会社 地盤試験所 山本 伊作
本稿（その3）では、CPTU から得られた三成分データに基づく換算 N 値および Robertson の地層区分について鉛直 CPTU と SPT を対比した。また、換算 N 値について鉛直 CPTU と斜め下方 CPTU を対比することにより、斜め下方 CPTU の有効性の確認を行った結果を報告する。
P16～
電気式コーン貫入試験の斜め下方貫入への試み（その4：ラジオアイソトープコーン貫入試験結果）
ソイルアンドロックエンジニアリング 株式会社 後藤 政昭
本稿（その4）では、RI-CPT の概要を詳述するとともに、鉛直（90 度）貫入と斜め下方貫入結果（湿潤密度、含水比）の対比や標準貫入試験より得られた試料や乱れの少ない試料にて実施した室内土質試験結果と対比した結果について報告する。

II. 第 53 回地盤工学研究発表会（8 編）投稿済

2018/7/24～26 サンポートホール高松（香川県高松市）

P19～
電気式コーン貫入試験の斜め下方貫入に関する研究(その 1：実証実験概要)
川崎地質 株式会社 脇中 康太
本研究は、電気式コーン貫入試験（以降、CPTU と記す）の新たな可能性を見出すことを目的とし、鉛直（90 度）貫入が前提である CPTU を斜め下方（75 度，60 度，45 度）に貫入し，斜め下方へ貫入するための方法や所要時間，鉛直貫入や室内土質試験結果等との比較などを行った。 本稿（その 1）では，CPTU の調査方法について概要を示す。また，斜め下方貫入試験の実証実験について，調査場所，調査内容，地盤条件の概要を報告する。
P21～
電気式コーン貫入試験の斜め下方貫入に関する研究（その 2：実績とこれからの利用）
株式会社 地圏総合コンサルタント 中川 清森
本稿（その 2）では，斜め下方貫入試験に関する海外での既往研究成果をレビューすると共に，①供用中の道路・鉄道盛土調査での活用，②河川堤防調査での活用，③既設構造物・建築物直下地盤調査での活用等を題材として，その有効活用方法や可能性・課題について提言を行う。
P23～
電気式コーン貫入試験の斜め下方貫入に関する研究（その 3：積算に関わる所要時間等について）
ソイルアンドロックエンジニアリング 株式会社 松浦 良信
本稿（その 3）では，斜め下方貫入に必要な治具，スクリューアンカーの設置方法などを紹介する。加えて，通常の鉛直貫入に対して斜め下方に貫入した場合のスクリューアンカー設置等の所要時間や試験の所要時間等を確認し，これらに基づく CPTU の斜め下方貫入の鉛直貫入費用に対する割増比（案）を勘案する。
P25～
電気式コーン貫入試験の斜め下方貫入に関する研究（その 4：斜め下方 CPT 結果の評価）
株式会社 地盤試験所 山本 伊作
本稿（その 4）では，CPTU から得られた三成分のデータおよび解析から得られた土質分類結果を対比し，調査角度によるデータへの影響を検討した結果を報告する。
P27～
電気式コーン貫入試験の斜め下方貫入に関する研究（その 5：斜め下方 RI-CPT 結果の評価）
ソイルアンドロックエンジニアリング 株式会社 長澤 遼
本稿（その 5）では，CPTU とともに実施したラジオアイソトープコーン貫入試験（RI-CPT）の概要を詳述するとともに，鉛直貫入と斜め下方貫入における結果（湿潤密度，含水比）の対比や標準貫入試験より得られた試料や乱れの少ない試料にて実施した室内土質試験結果と対比した結果について報告する。

P29～
電気式コーン貫入試験の斜め下方貫入に関する研究（その 6：N 値と物理試験結果の評価）
株式会社 地盤試験所 北條 豊
本稿（その 6）では，CPTU のデータから既存の変換式を用いて求めた N 値（N _c ）と細粒分含有率（F _c ）について，実測値と対比検証を行った。また、調査角度毎に比較検討し，調査角度が推定値に与える影響について報告する。

P31～
電気式コーン貫入試験の斜め下方貫入に関する研究（その 7：一軸圧縮試験の異方性評価）
興亜開発 株式会社 鳥越 崇
本稿（その 7）では，一軸圧縮試験の供試体サイズ（φ15，φ35）について比較検討を行う。また、CPTU と同角度（90 度，75 度，60 度，45 度）の供試体（φ15）を製作して実施した一軸圧縮試験結果について比較検証を行い，CPTU から求めるコーン指数について検討した結果を報告する。

P33～
電気式コーン貫入試験の斜め下方貫入に関する研究（その 8：力学試験結果の評価）
中央開発 株式会社 栗原 朋之
本稿（その 8）では，乱れの少ない粘性土試料から三軸圧縮試験（UU）と一面せん断試験（圧密定体積）を実施し，CPTU から求めるコーン指数について調査角度毎に比較検討を行った。また、圧密試験結果と CPTU から求める圧密降伏応力について調査角度毎に比較検討を行った結果を報告する。

電気式コーン貫入試験の斜め下方貫入への試み (その 1：実証実験概要)

電気式コーン貫入試験
斜め下方貫入
実証実験

(株)地盤試験所	正会員○北條 豊
ソイル・アンド・ロック・エンジニアリング(株)	正会員 松浦良信
川崎地質(株)	正会員 脇中康太
大和探査技術(株)	糸井理樹
(株)地球科学総合研究所	正会員 原 彰男
日本物理探査(株)	正会員 岡嶋真一
東邦地下工機(株)	正会員 片山浩明
中央開発(株)	正会員 西原 聡

1 概要

電気式コーン貫入試験（以降、CPTU と記す）¹⁾はボーリング調査に比べ迅速、かつ原位置にて力学・物理特性を把握することができ、地盤調査を実施する上で有効な手段である。ただし、貫入方法や結果の解釈は鉛直貫入が前提である。CPTU の斜め調査が有効となれば、図-1 に示す盛土の法肩や法尻、盛土小段からの調査、あるいは既設構造物下部の地盤調査など、その活用範囲は格段に広がるものと考えられる。

本実験では、鉛直（90°）および斜め下方（75°、60°、45°）の CPTU とラジオアイソトープコーン貫入試験（以降、RI-CPT と記す）を実施し、標準貫入試験（以降、SPT と記す）や室内土質試験結果と比較するとともに、斜め CPTU 調査方法の測定精度と解釈の検証を行う。また、CPTU による斜め方向の地盤調査手法を確立するとともに、適用範囲を明らかにする。

本稿（その 1）では、実験調査の概要について報告する。

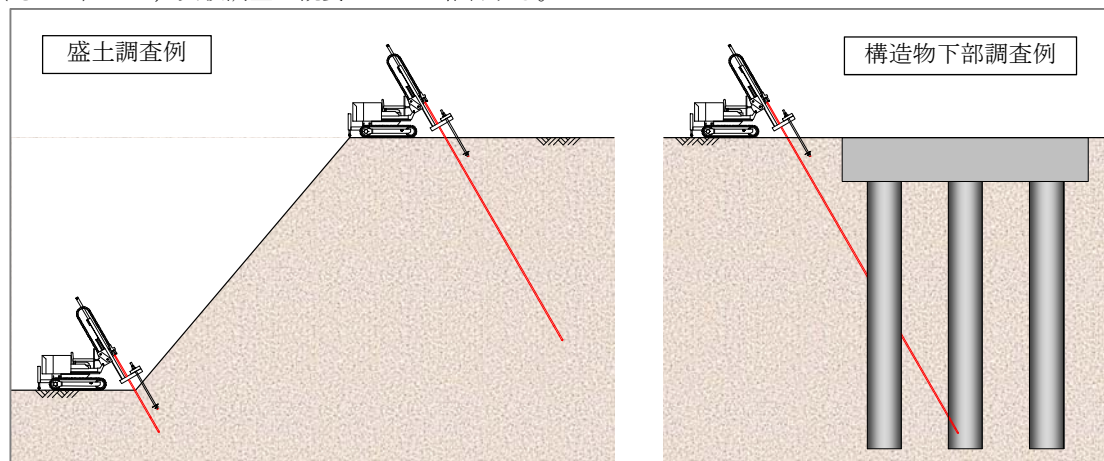


図-1 斜め CPTU の活用例

2 調査内容

調査内容を表-1 に示す。

本実験では、CPTU と RI-CPT について、鉛直（90°）と斜め下方（75°、60°、45°）の 4 角度で実施した。調査深度は鉛直距離で 20m とした。また、現地盤を確認する目的で、SPT とサンプリングおよび室内土質試験を実施した。

調査角度による積算補正係数を設定する能率調査として、各調査角度の作業時間を記録した。

表-1 調査内容

調査内容		調査深度		備考
		鉛直距離	斜距離	
CPTU RI-CPT	90°	20.0m	—	2 地点
	75°	20.0m	20.7m	1 地点
	60°	20.0m	23.1m	1 地点
	45°	20.0m	28.3m	1 地点
鉛直 SPT		20.0m	—	0.5m 間隔
サンプリング		20.0m	—	砂質土 2 深度、粘性土 14 深度
室内土質試験				ペネ試料、サンプリング試料
能率調査				調査角度による作業時間

An attempt to inclined downward penetration of electric cone penetration test (Part 1:Outline of Investigation)

Yutaka Hojo, Jibanshikenjo Co., Ltd.
Yoshinobu Matsuura, Soil and Rock Engineering Co., Ltd.
Kota Wakinaka, Kawasaki Geological Eng. Co., Ltd.
Yoshiki Itoi, DAIWA Exploration & Consulting Co., Ltd.
Akio Hara, JGI, Inc.
Shinichi Okajima, Nippon Geophysical Prospecting Co., Ltd.
Hiroaki Katayama, Toho Chikakoki Co., Ltd.
Satoshi Nishihara, Chuo Kaihatsu Co., Ltd.

3 調査位置

調査位置の平面図と断面図を図-2 に示す。また、断面図には SPT の結果を示す。

本実験では、調査範囲の土層の不陸が各調査角度に影響しないよう、また、なるべく調査範囲が最小となるよう調査位置の配置を行った。また、鉛直 CPTU は、標準データとする中央部①と 45°調査の先端部の土層が確認できる位置②の 2 箇所を実施し、土層の不陸を確認した。

本実験の調査地盤は、GL-3.90m まで N=1~6 の砂質土主体の埋土、その下部に層厚 0.35m の有機質土、GL-4.25m~GL-6.00m まで N=4~13 の砂質土となり、GL-6.00m 以深は N=0~3 の粘性土で構成されている。

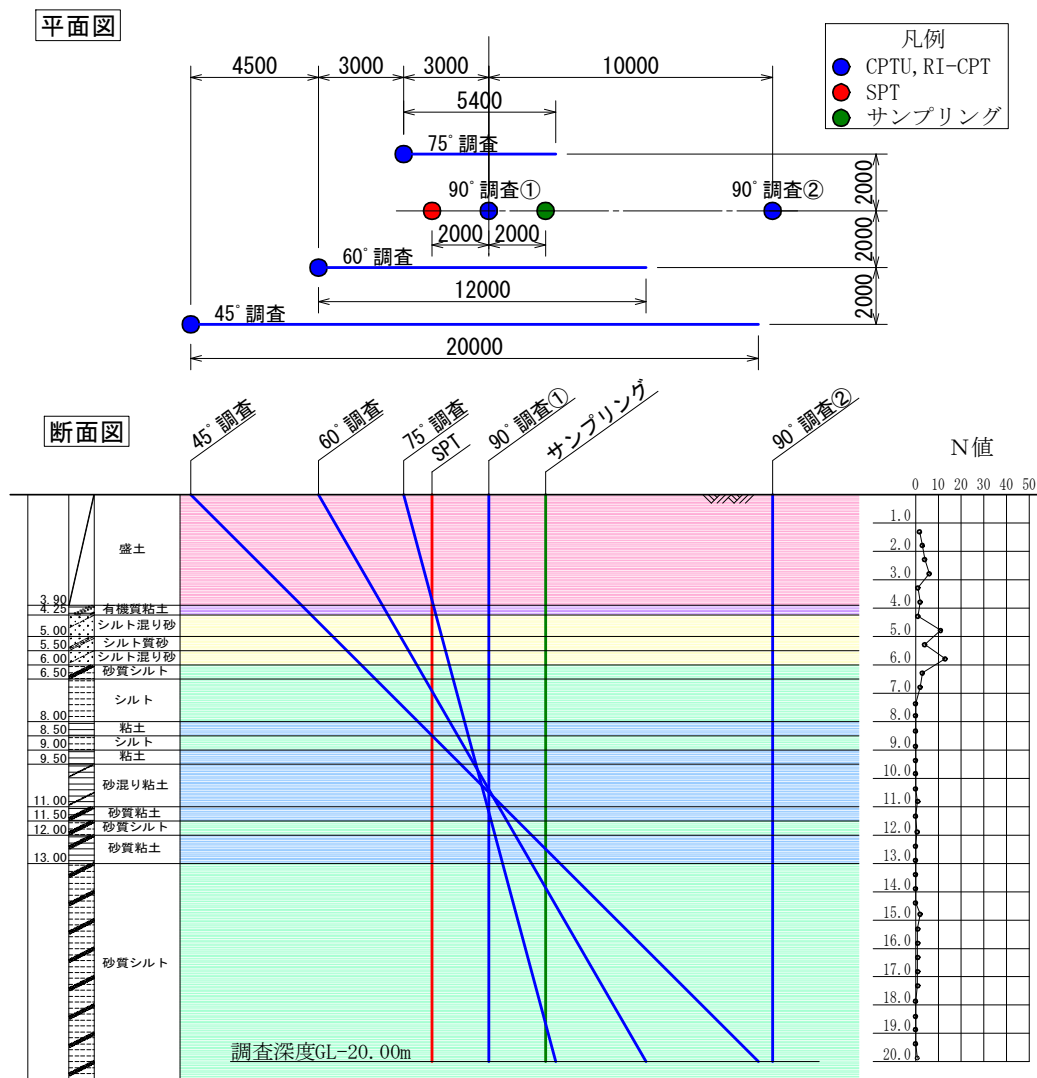


図-2 調査位置

4 CPTU, RI-CPT 調査方法

(1) コンプローブの仕様

CPTU と RI-CPT のコンプローブの仕様を表-2 に示す。

表-2 各コンプローブの仕様

名称	電気式コンプローブ(三成分コンプローブ)					RI 密度計プローブ+線源コーン
型式	SR3Eit-DIG-TP1					SRD-1DP-DIG-TP1
使用線源	—					セシウム 137 ¹³⁷ Cs 3.7MBq
センサー	先端抵抗	周面摩擦	間隙水圧	傾斜角度	温度計	Nal(Tl) シンチレーションカウンター
測定レンジ	0~30MPa	0~1MPa	-0.1~1MPa	-60~60°	0~50°C	1.0~2.3g/cm ³
寸法	直径 35.7mm(フリクションカッター部: 直径 48.6mm), 長さ 750mm					直径 48.6mm, 長さ 1,100mm

(2) 貫入装置

貫入装置の性能を表-3 に示す。

本実験で使用する貫入装置は、Geoprobe 社製 6610DT を使用した。泥水削孔+標準貫入試験が可能な「SPT システム」が利用でき、マシン一台で CPTU と SPT の調査を実施した（ダブルサウンディングと略称する²⁾）。電気式静的コーン貫入試験方法（JGS 1435）では、貫入速度を 20mm±5mm/秒としており、貫入装置は貫入速度 20mm/秒で圧入するように設定されている。

表-3 貫入装置の性能

最大貫入力	160kN	最大油圧	16.9MPa
最大引抜力	200kN	ストローク	1676mm
自重	2225kg	回転トルク（本体）	759Nm
幅 × 長	1219mm × 2388mm	回転トルク（SPT 部）	3000Nm
高さ	2159mm	アンカー形式	分離式
マスト伸長時高さ	3886mm	最小作業スペース	2.5m × 4.5m

(3) 反力設置

反力のスクリーアンカーは、図-3 に示すように調査角度と同じ角度で施工した。反力を設置する際には、初期の施工角度に差が生じないように、表層部の草や根を除去してから施工を開始した。反力施工時には、施工角度を保持するために、図-4 に示す反力施工ガイドを貫入機フット部に固定して使用した。

(4) 貫入試験

斜め CPTU 調査時には、調査角度を保持するために図-5 に示すようにケーシングを設置し、貫入機フット部にロッドガイドを使用した。ケーシング頭部には、CPTU ロッド（φ36.6mm）を固定する半割りのスペーサー（図-6）を設置して調査角度を保持した。



図-3 反力設置（45°）



図-4 反力施工ガイド

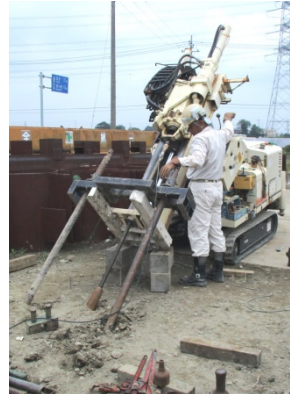


図-5 貫入試験（45°）



図-6 スペーサー

(5) 補正深度と水平移動量

測定データの貫入深度 D および貫入角度 θ を用いて補正深度 D_m と水平移動量 δ_m を次式により求めた。

《補正深度》

$$\begin{aligned}
 D_{m(i)} &= D_{m(i-1)} + \Delta D_{m(i)} \\
 \Delta D_{m(i)} &= \cos((\theta_{m(i)} + \theta_{m(i-1)})/2) \cdot \Delta D_{(i)} \\
 \Delta D_{(i)} &= D_{(i)} - D_{(i-1)}
 \end{aligned}$$

ここで、

$D_{m(i)}, D_{m(i-1)}$: 補正深度(m)
 $\Delta D_{m(i)}$: 区間補正深度(m)
 $\theta_{m(i)}, \theta_{m(i-1)}$: 貫入角度(deg)
 $D_{(i)}, D_{(i-1)}$: 貫入深度(m)
 $\Delta D_{(i)}$: 区間貫入距離(m)

《水平移動量》

$$\begin{aligned}
 \delta_{m(i)} &= \delta_{m(i-1)} + \Delta \delta_{m(i)} \\
 \Delta \delta_{m(i)} &= \sin((\theta_{m(i)} + \theta_{m(i-1)})/2) \cdot \Delta D_{(i)} \\
 \Delta D_{(i)} &= D_{(i)} - D_{(i-1)}
 \end{aligned}$$

ここで、

$\delta_{m(i)}, \delta_{m(i-1)}$: 水平移動量(m)
 $\Delta \delta_{m(i)}$: 区間水平移動量(m)
 $\theta_{m(i)}, \theta_{m(i-1)}$: 貫入角度(deg)
 $D_{(i)}, D_{(i-1)}$: 貫入深度(m)
 $\Delta D_{(i)}$: 区間貫入距離(m)

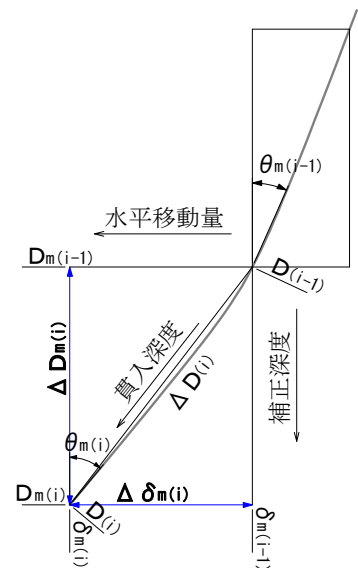


図-7 貫入角度による補正概念

5 室内試験

室内土質試験は、乱れの少ない試料と標準貫入試験で採取した乱した試料を用いて実施した。

50cm ピッチで実施する SPT の試料は、土粒子の密度試験、含水比試験、粒度試験、液性・塑性限界試験を実施した。粒度試験は粘性土の場合沈降まで実施した。また、表層の埋土は 1m 間隔とした。

乱れの少ない試料は、粘性土で一軸圧縮試験、三軸 (UU) 試験、圧密試験を実施し、砂質土で三軸 (CD) 試験を実施した。また、細粒分含有率が $20\% < F_c < 50\%$ の場合には、三軸 (CU) 試験を実施し、一軸圧縮試験を実施する試料については一面せん断試験 (圧密定体積) を実施した。

CPTU を斜めに実施する際に、土の強度異方性を確認することとした。強度異方性は、粒子の配向性による堆積構造の固有異方性と、鉛直方向の有効土被り圧 σ'_{v0} と水平方向の静止土圧 $K_0\sigma'_{v0}$ の異方的な応力状態による誘導異方性の影響を受けていると言われている。

土の異方性は一軸圧縮試験で確認することとした。即ち、図-8 に示すように 75° 、 60° 、 45° の角度で $\phi 15\text{mm}$ 、 $L=30\text{mm}$ の供試体を作成し、一軸圧縮試験を実施した。

表-4 室内試験内容

土質	試料番号	深度 (m)	物理試験	試料番号	深度 (m)	物理試験	力学試験
			含水比 土粒子の密度			含水比 土粒子の密度	一軸圧縮試験 三軸圧縮試験 一面せん断試験
FI	P1	1.15	1.45	○	○	○	
	P2	2.15	2.45	○	○	○	
	P3	3.15	3.45	○	○	○	
OH-S	P4	4.00	4.25	○	○	○	
S-M	P5	4.65	4.95	○	○	○	
SM	P6	5.15	5.45	○	○	○	
S-M	P7	5.65	5.95	○	○	○	
MS	P8	6.15	6.45	○	○	○	
M	P9	6.65	6.95	○	○	○	
	P10	7.15	7.45	○	○	○	
	P11	7.65	7.95	○	○	○	
C	P12	8.15	8.45	○	○	○	
M	P13	8.65	8.95	○	○	○	
C	P14	9.15	9.45	○	○	○	
C-S	P15	9.65	9.95	○	○	○	
	P16	10.15	10.45	○	○	○	
	P17	10.65	10.95	○	○	○	
CS	P18	11.15	11.45	○	○	○	
MS	P19	11.65	11.95	○	○	○	
CS	P20	12.15	12.45	○	○	○	
	P21	12.65	12.95	○	○	○	
	P22	13.15	13.45	○	○	○	
MS	P23	13.65	13.95	○	○	○	
	P24	14.15	14.45	○	○	○	
	P25	14.65	14.95	○	○	○	
	P26	15.15	15.45	○	○	○	
	P27	15.65	15.95	○	○	○	
	P28	16.15	16.45	○	○	○	
	P29	16.65	16.95	○	○	○	
	P30	17.15	17.45	○	○	○	
	P31	17.65	17.95	○	○	○	
	P32	18.15	18.45	○	○	○	
	P33	18.65	18.95	○	○	○	
	P34	19.15	19.45	○	○	○	
	P35	19.65	19.95	○	○	○	
	T1	7.0	8.0	○	○	○	
	T2	8.0	9.0	○	○	○	
	T3	9.0	10.0	○	○	○	
	T4	10.0	11.0	○	○	○	
	T5	11.0	12.0	○	○	○	
	T6	12.0	13.0	○	○	○	
	T7	13.0	14.0	○	○	○	
	T8	14.0	15.0	○	○	○	
	T9	15.0	16.0	○	○	○	
	T10	16.0	17.0	○	○	○	
	T11	17.0	18.0	○	○	○	
	T12	18.0	19.0	○	○	○	
	T13	19.0	20.0	○	○	○	

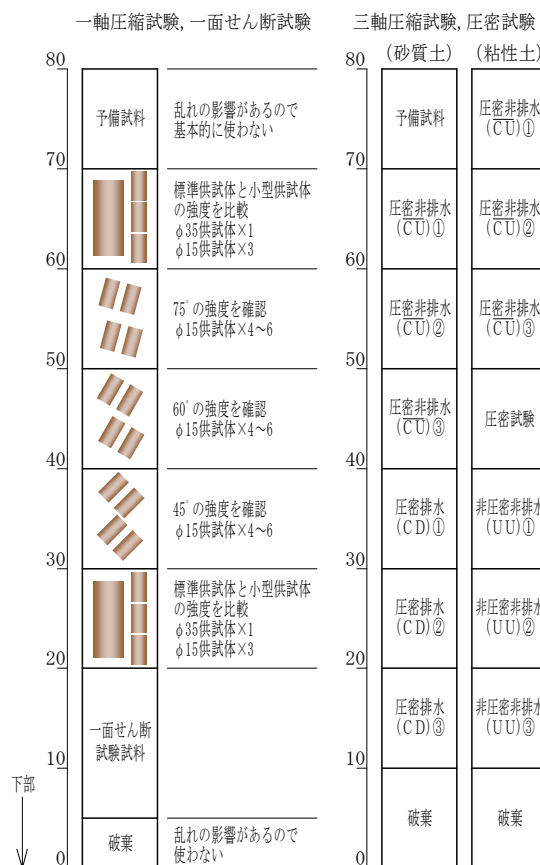


図-8 室内試験位置

6 まとめ

本実験では、斜め下方の CPTU と RI-CPT を実施するとともに、詳細な SPT と室内土質試験を実施した^{3)~5)}。この結果から、今後下記について評価・検討することで、CPTU による斜め方向の地盤調査手法を確立するとともに、適用範囲を明らかにしてゆく所存である。

- ①斜め下方調査の手法について評価する。
- ②鉛直 CPTU, RI-CPT と SPT, 室内試験の結果について比較検討を行い、CPTU と RI-CPT の有用性を評価する。
- ③鉛直調査結果と斜め調査結果について比較検討を行い、有用性を評価するとともに補正方法の検討を行う。
- ④土質試験の相互評価および一軸圧縮試験の供試体サイズについて有用性の評価を行う。

参考文献：1)地盤調査の方法と解説 (2013) 公益財団法人地盤工学会。 2)後藤政昭・石井正紀・北條豊・岡信太郎・西原聡・黛廣志・石川恵司・若月洋朗：電気式コーン貫入試験 (CPTU) による地盤評価手法の提案 第 13 回地盤工学会関東支部発表会講演集, 2016.10。 3)石井正紀・高橋千代丸・若月洋朗・小林優起・武政学・太田雅之・岸孝司・日下部祐基：電気式コーン貫入試験の斜め下方貫入への試み (その 2：貫入方法や所要時間等について), 第 14 回地盤工学会関東支部発表会 (投稿中), 2017.11。 4)山本伊作・重富正幸・栗原朋之・久下信明・橘久生・佐渡耕一郎・大塚潤・深沢健：電気式コーン貫入試験の斜め下方貫入への試み (その 3：電気式コーン貫入試験結果の評価), 第 14 回地盤工学会関東支部発表会 (投稿中), 2017.11。 5)後藤政昭・石川恵司・大森将樹・野口浩承・中川範彦・金道繁紀・黛廣志・齋藤邦夫：電気式コーン貫入試験の斜め下方貫入への試み (その 4：ラジオアイソトープコーン貫入試験結果), 第 14 回地盤工学会関東支部発表会 (投稿中), 2017.11

電気式コーン貫入試験の斜め下方貫入への試み(その 2: 貫入方法や所要時間等について)

電気式コーン貫入試験 斜め下方貫入 試験の所要時間

ソイルアントロックエンジニアリング(株)	正会員	○石井正紀
(株)地盤試験所	正会員	高橋千代丸
千葉エンジニアリング(株)	正会員	若月洋朗
川崎地質(株)	正会員	小林優紀
基礎地盤コンサルタンツ(株)	正会員	武政 学
(株)ダイヤコンサルタント	正会員	太田雅之
(株)相愛		岸 孝司
(株)プラテック	正会員	日下部祐基

1. はじめに

電気式コーン貫入試験（以降、CPTU と記す）は、ボーリング調査に比べ迅速、かつ原位置にて力学、物理特性を把握することができ、地盤調査や地盤構造物の現状調査を実施する上で有効な手段である。しかし、現時点での貫入方法、結果の解釈は、鉛直下方貫入が前提である。CPTU の斜め下方貫入が可能となれば、その活用範囲は格段に広がるものとする（例えば、供用中の道路盛土の法肩や盛土小段からの調査あるいは橋脚間地盤の状況調査¹⁾ など）。

本試験では、鉛直（90°）および斜め下方（75°、60°、45°）貫入の CPTU を実施し、実際に斜め下方に貫入する方法や試験に要する時間等の確認や問題点の抽出、鉛直貫入と斜め下方貫入における試験結果の比較検討や室内土質試験結果などとの比較検討を行った。

本稿（その 2）においては、斜め下方貫入に必要な治具、スクリーアンカーの設置方法などを紹介する。加えて、通常の鉛直（90°）貫入に対して 75°、60°、45° で斜め下方に貫入した場合のスクリーアンカー設置等の所要時間や試験の所要時間、設定貫入角度と実測貫入角度の差異等についても報告する。

なお、試験位置等の試験概要の詳細は、参考文献 2) を参照されたい。また、本稿（その 2）における CPTU 結果は、参考文献 2) の試験位置図に示されるボーリング調査近傍にて実施したものである。

2. 試験準備

CPTU は、写真-1 に示す自走式専用貫入車²⁾ 等により鉛直下方にコーンプローブを静的に貫入しながら、コーン貫入抵抗 q_c 、周面摩擦 f_s 、間隙水圧 u を深度方向に連続測定する試験である（先に示した 3 成分以外にも 3 成分の計測値の補正に使用する貫入時の角度、プローブ温度の測定も行っている）。写真-1 に示す自走式専用貫入車は車両質量約 2,200kg であるが、写真-2 に示すスクリーアンカーを図-1 に示すように設置することで地盤の状態にもよるが貫入力を最大 165kN 得ることができる。

本試験においても写真-1 に示す自走式専用貫入車を用いて貫入を行ったが、車両質量だけでは貫入力不足となることが考えられたため鉛直貫入同様、スクリーアンカーを設置することとした。ただし、本試験における斜め下方貫入のスクリーアンカーは、図-2 に示すようにコーン



写真-2 スクリューアンカーと延長ロッド

写真-1 自走式専用貫入車²⁾

プローブの設定貫入角度と同等の角度で設置することとした。

スクリーアンカー設置方法は、自走式専用貫入車のスクリーアンカー設置装置を所定の設置角度に傾け、写真-3 に示すような治具を自走式専用貫入車に取付けて設置角度を保持できるよう工夫した²⁾。その結果、

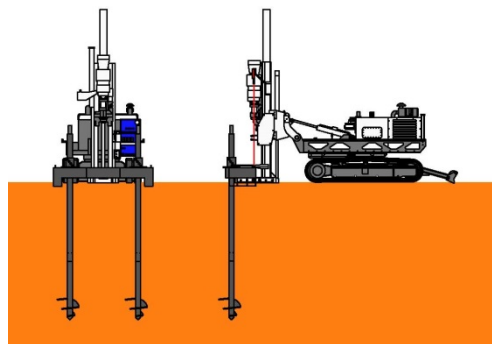


図-1 鉛直貫入時のスクリーアンカー設置状況(概略)

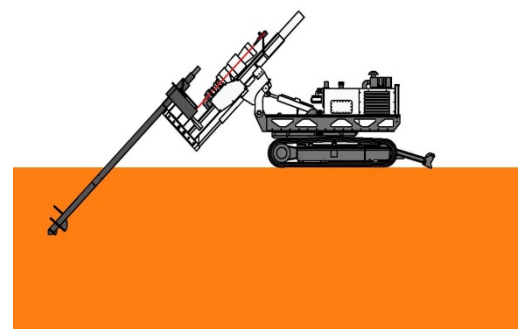


図-2 斜め下方貫入時のスクリーアンカー設置状況(概略)

An attempt to inclined downward penetration of electric cone penetration test (Part 2 : Method for penetration and required time etc.)

Masanori Ishii Soil and Rock Engineering Co.,Ltd. ,Chiyomaru Takahashi Jibanshikenjo Co.,Ltd.
Hiroaki Wakatsuki CHIBA ENGINEERING Co.,Ltd.
Yuki Kobayashi Kawasaki Geological Eng. Co.,Ltd.
Manabu Takemasa kiso-jiban Consultants Co.,Ltd.
Masayuki Oota DIA CONSULTANTS Co.,Ltd.
Takashi Kishi Soai Co.,Ltd. ,Yuuki ,Kusakabe PLATECK Co.,Ltd.

表-1 に示すように設置角度 75° に対しては約 65° と 10° 程度傾きが大きくなっているが、それ以外はほぼ設定した設置角度どおりにスクリューアンカーを設置できたものと判断できる。また、スクリューアンカー設置（貫入試験を実施するにあたっての準備作業完了まで）に必要な時間は、鉛直（90°）貫入を基準とした場合、表-1 に示すように鉛直（90°）からの傾きが大きくなるにつれ設置時間が多くかかることが確認できた。加えて、必然ではあるがスクリューアンカー設置角度の傾きが大きくなるにつれスクリューアンカーの延長ロッドの本数も多く必要となることも合わせて確認できた。ただし、設置角度 45° については、スクリューアンカーの設置以外にコーンプローブをできるだけ設定貫入角度どおり貫入するために地表面から斜距離で約 0.8m ケーシングパイプ（φ86mm）を設置した（写真-4 参照）。表-1 に示す鉛直（90°）に関する時間比は、このケーシングパイプ設置時間は含まれておらず、あくまでもスクリューアンカー設置時間のみである。



写真-4 ケーシングパイプ設置状況²⁾



写真-3 スクリューアンカーガイド²⁾

表-1 鉛直（90°）設置に対する時間比他

設置角度 (°)	実測角度(°)			鉛直（90°）に 対する時間比
	右側	左側	平均値	
90(鉛直)	—	—	—	1.00
75	66.8	64.9	65.9	2.23
60	62.0	57.7	59.9	2.65
45	45.0	46.0	45.5	3.85

3. 試験の所要時間等について

CPTU の所要時間等について取りまとめたものを表-2 に示す。本試験における貫入速度は、地盤工学会基準 JGS 1435-2012 電気式コーン貫入試験方法に示される標準貫入速度である 20mm/s±5mm/s とした。

貫入角度が鉛直（90°）と同等の貫入長の試験を斜め下方貫入で実施する場合、貫入速度、貫入角度が一

表-2 CPTU の所要時間等

設定貫入角度(°)		鉛直(90)	75	60	45
CPTU	貫入長(m)	20.85	21.50	24.33	31.61
	鉛直貫入に対する貫入長比	1.00	1.03	1.17	1.52
	鉛直貫入に対する実際の試験時間比	1.00	0.97	1.17	1.28
	1m貫入するために要する時間(分)	1.5	1.4	1.5	1.3
	鉛直引抜きに対する時間比	1.00	1.44	2.10	2.42
RI-CPT	貫入長(m)	20.85	21.50	24.33	31.61
	鉛直貫入に対する貫入長比	1.00	1.03	1.17	1.52
	鉛直貫入に対する実際の試験時間比	1.00	1.02	1.10	1.53
	1m貫入するために要する時間(分)	1.5	1.5	1.5	1.6

注) 表中の貫入長は、実際に貫入した斜距離を示す。

定であれば貫入角度の傾きが大きくなるにつれ貫入長は長くなり、貫入用ロッドの継足し作業などを含めた、貫入に要した全ての時間（以降、試験時間と記す）もその分長くなると考える。今回試験を実施した各設定貫入角度における貫入長（実際に貫入した斜距離）は、設定貫入角度 90°（鉛直）、75°、60°、45° の順に 20.85m、21.50m、24.33m、31.61m となる。設定貫入角度 90°（鉛直）を基準として貫入長を対比すると、設定貫入角度 75°、60°、45° の順に 1.03 倍、1.17 倍、1.52 倍となる（因みに、鉛直距離 1m を一定の貫入角度 75°、60°、45° で斜め下方に貫入した場合の斜距離はそれぞれ、1.04m、1.15m、1.41m となる）。次に、設定貫入角度 90°（鉛直）を基準とした実際の試験時間を対比すると、設定貫入角度 75°、60°、45° の順に 0.97 倍、1.17 倍、1.28 倍となる。

これらの結果から、鉛直貫入と斜め下方貫入による試験時間の差異は、斜め下方貫入による作業の煩雑さや手間の増加などによるものはほとんどなく、大半が貫入長の差異によるものであることがわかる。しかし、貫入長比と実際の試験時間比を比較すると、設定貫入角度 75°、45° は、貫入長比よりも実際の試験時間比の方が小さくなっている。これは、表-2 に示す 1m 貫入するのに要する時間、すなわち貫入速度や貫入角度によるばらつきが影響しているものと考えられる。

因みに、今回 CPTU に加えて実施したラジオアイソトープ貫入試験（RI-CPT）⁴⁾ の試験時間は、表-2 に示すように CPTU 同様、貫入角度の傾きが大きくなるにつれ長くなる結果となっている（試験時間比と貫入長比はほぼ同等の傾向が窺える）。

次に、試験完了後（貫入完了後）に行うコーンプローブ引抜き作業の時間比は、設定貫入角度 90°（鉛直）を基準とすると、貫入角度 75°、60°、45° の順に 1.44 倍、2.10 倍、2.42 倍となる（表-2 参照）。この結果から、コーンプローブ引抜きに要する時間は、先に示した試験時間同様、貫入角度の傾きが大きくなる、すなわち貫入長の増加に伴い長い時間を必要とするが、試験時間（貫入時間）における貫入長比とは同等

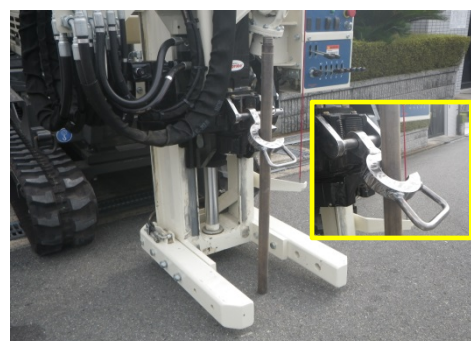


写真-5 ロッド引抜き用トング

でない。これは、設定貫入角度 90° （鉛直）時に使用する引抜き治具が通常のボーリング作業時に行うロッドの挿入や引抜きに使用するトング（写真-5 参照）を自走式専用貫入車に取付けてほぼ連続的にロッドを引抜くのにに対して、設定貫入角度 75° 、 60° 、 45° 時のロッド引抜き方法が、貫入したロッド先端に写真-6 に示すような治具を取付け、自走式専用貫入車にてロッドを引抜くためであると考えられる。この治具は、引抜いたロッドの連結部で切離す度に外しては次の引抜きを行うロッドに取付けるという作業を貫入した最終ロッドを引抜くまで繰返し行わなければならない。

つまり、斜め下方貫入後のコーンプローブの引抜き作業は、試験（貫入作業）とは異なり、貫入角度の傾きが大きくなればなるほど作業はより煩雑になり、手間も増えることが分かった。

4. 設定貫入角度と傾斜角度について

表-3 に CPTU の設定貫入角度と傾斜角度等を取りまとめて示す。図-3 には傾斜角度と貫入長の関係を、図-4 には傾斜角度を基に算出した水平移動距離と補正深度の関係を示す。なお、傾斜角度は、コーンプローブに内蔵された加速度センサーにより計測した値である。

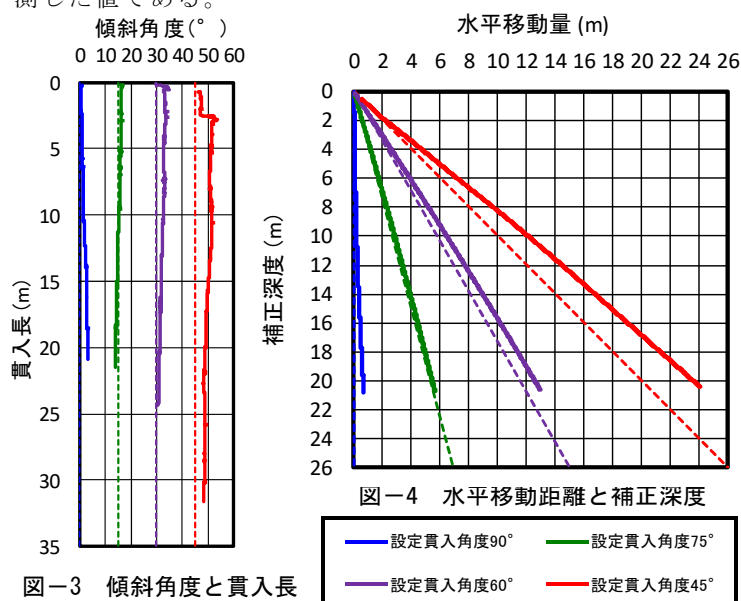


図-3 傾斜角度と貫入長

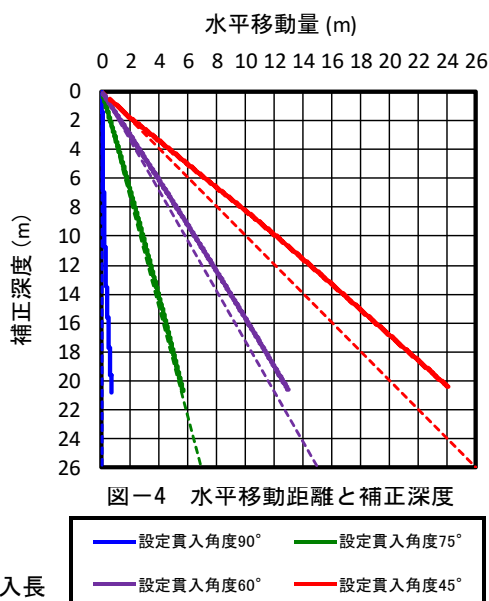


図-4 水平移動距離と補正深度

次に図-4 に示す設定貫入角度 75° 、 60° 、 45° の水平移動距離と補正深度の関係をみると、設定貫入角度 75° はほぼ設定した貫入角度どおり貫入できているが、設定貫入角度 60° 、 45° は、設定した貫入角度に対して差異が生じている。最終補正深度における水平移動距離の差異は、設定貫入角度 60° が $+0.84\text{m}$ 、設定貫入角度 45° が $+1.76\text{m}$ である。これは、地表面から約 4.0m の厚さの盛土層（参考文献 2）、3）参照）に含まれる大礫や堅固な層等にコーン先端が当たり、貫入角度が大きく変化したことによるものと考えられる（貫入初期の障害物の影響、図-3 参照）。

5. まとめと今後の課題

試験準備や試験の所要時間等について本試験にて確認できたことは、①斜め下方にスクリーアンカーを設置するには自走式専用貫入車に設置角度を保持する治具や工夫が必要、②スクリーアンカーの設置角度の傾きが大きくなればなるほど設置時間は多く掛かる、③試験時間（貫入時間）は、貫入長に比例して増加するが、引抜き時間は試験時間のように貫入長に比例するのではなく、貫入角度の傾きが大きくなればなるほど作業はより煩雑になり、手間も増え時間が多く掛かる、④軟弱な地盤であれば貫入深度が深くなるにつれ貫入したロッドやコーンプローブの重みで重力方向に僅かではあるが傾斜する、⑤設定貫入角度と実測貫入角度の差異（最終補正深度における水平移動距離）は、貫入初期の障害物の有無に大きく左右されるなどである。

今後は、今回試験を行った地盤よりも強固な地盤（ N 値が比較的高く、多少の礫分を含むような地盤）を対象に斜め下方貫入による試験を実施し、今回確認した事象を改めて検証する必要がある。加えて、斜め下方貫入がスムーズに行えるような治具の開発や工夫を考案していく所存である。

参考文献

- 1) 高橋宏和・谷本俊輔・七澤利明:既設道路橋杭基礎の耐震性評価のための杭間地盤調査, 土木技術資料, Vol.59 JULY 2017, pp.34-37
- 2) 北條豊・松浦良信・脇中康太・糸井理樹・原彰男・岡嶋眞一・片山浩明・西原聡:電気式コーン貫入試験の斜め下方貫入への試み(その1:実証実験概要), 第14回地盤工学会関東支部発表会(投稿中), 2017.11
- 3) 山本伊作・重富正幸・栗原朋之・久下信明・橘久生・佐渡耕一郎・大塚潤・深沢健:電気式コーン貫入試験の斜め下方貫入への試み(その3:電気式コーン貫入試験結果の評価), 第14回地盤工学会関東支部発表会(投稿中), 2017.11
- 4) 後藤政昭・石川恵司・大森将樹・野口浩承・中川範彦・金道繁紀・黛廣志・齋藤邦夫:電気式コーン貫入試験の斜め下方貫入への試み(その4:ラジオアイソトープコーン貫入試験結果), 第14回地盤工学会関東支部発表会(投稿中), 2017.11

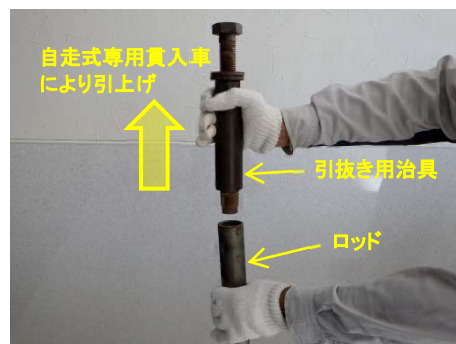


写真-6 ロッド引抜き用治具

表-3 設定貫入角度と傾斜角度等

設定貫入角度	90°	75°	60°	45°
貫入長	20.85m	21.50m	24.33m	31.61m
補正深度	20.84m	20.74m	20.60m	20.44m
最終補正深度における水平移動量	0.69m (0.0m)	5.65m (5.56m)	12.95m (12.11m)	24.10m (22.34m)
傾斜角度	最大	3.39°	16.71°	34.82°
	最小	0.28°	13.80°	29.54°
			46.20°	

注) () 内の値は、設定貫入角度で貫入した場合の水平移動距離を示す。

設定貫入角度 90° （鉛直）の傾斜角度は、最終貫入長で 3.39° 傾斜しているが（最終補正深度における水平移動距離は 0.69m ）、地盤工学会基準 JGS 1435-2012 電気式コーン貫入試験方法に示されている傾斜角度の許容値（鉛直に対して 15° ）以内である。設定貫入角度 75° 、 60° 、 45° の傾斜角度は、貫入が浅い区間では設定貫入角度と乖離していく傾向にあるが、貫入が深くなるにつれ設定貫入角度と徐々に整合していく傾向が窺える（図-3 参照）。これは、今回試験を実施した地盤が非常に軟弱な沖積層（参考文献 2）、3）参照）で、貫入したロッドやコーンプローブの重みで重力方向に僅かではあるが傾斜しながら貫入しているのではないかと考える。

電気式コーン貫入試験の斜め下方貫入への試み
(その 3 : 電気式コーン貫入試験結果の評価)

電気式コーン貫入試験
斜め下方貫入
土質分類

(株)地盤試験所	正 会 員	○山本伊作
ソイルアント・ロックエンジニアリング(株)	正 会 員	重富正幸
中央開発(株)	正 会 員	栗原朋之
(株)タエーコンサルタンツ		久下信明
興亜開発(株)	正 会 員	橘 久生
(株)地圏総合コンサルタント	特別会員	佐渡耕一郎
(株)タカラエンジニアリング	正 会 員	大塚 潤
日揮(株)	国際会員	深沢 健

1 概要

本実験では、鉛直 (90°) および斜め下方 (75°, 60°, 45°) の電気式コーン貫入試験 (以降、CPTU と記す) を実施し、CPTU と標準貫入試験 (以降、SPT と記す)、および鉛直 CPTU と斜め下方 CPTU の結果を比較検証した。

本稿 (その 3) では、鉛直 CPTU の解析結果と SPT の結果を比較検討し、また、鉛直 CPTU と斜め下方 CPTU を対比することにより、斜め下方 CPTU の有効性の確認を行った。なお、本実験の調査概要および斜め下方調査の調査角度結果は参考文献 1), 2) を参照されたい。

2 鉛直 CPTU と SPT の比較

本実験の地盤調査結果 (鉛直 90°) を図-1～図-2 に示す。

SPT の結果から GL-3.90m まで $N=1\sim6$ の砂質土主体の埋土、その下部に層厚 0.35m の有機質シルト、GL-4.25m～GL-6.00m まで $N=4\sim13$ の砂質土、GL-6.00m～GL-11.80m まで $N=0\sim3$ の粘性土となり、GL-11.80m 以深は $N=0\sim2$ のシルト質細砂で構成されている。しかし、GL-11.80m 以深の砂質土は CPTU の間隙水圧に着目すると過剰間隙水圧が発生しており、CPTU では粘性土の性状を示している。粒度試験結果を考慮した柱状図では、GL-11.80m 以深は砂質粘土～砂質シルトであった。このことから、目視による中間土の土層判定は土質試験結果と誤差を生じる可能性があるのに対し、CPTU では土質の性状を正確に判定することができる。なお、本実験地盤の柱状図は、粒度分布から求めた柱状図を採用する。

GL-4.25m～GL-6.50m の砂質土層では、補正先端抵抗 $q_t=5.5\sim7.1\text{MPa}$ 、周面摩擦 $f_s=56\sim80\text{kPa}$ をピークとし、中間に q_t 、 f_s の低下と間隙水圧 u の上昇が見られることから薄い粘性土が挟在する。GL-7.0m～GL-11.0m の粘性土層では、 q_t 、 u は深度に比例して大きくなるが、GL-11.00m～GL-14.50m では q_t に変化はなく f_s 、 u は若干低下する傾向があり、これは鋭敏比が低くなった挙動であることが予測される。GL-14.50m～GL-16.50m では q_t の増加と u の低下により、砂分が増えていることが伺える。

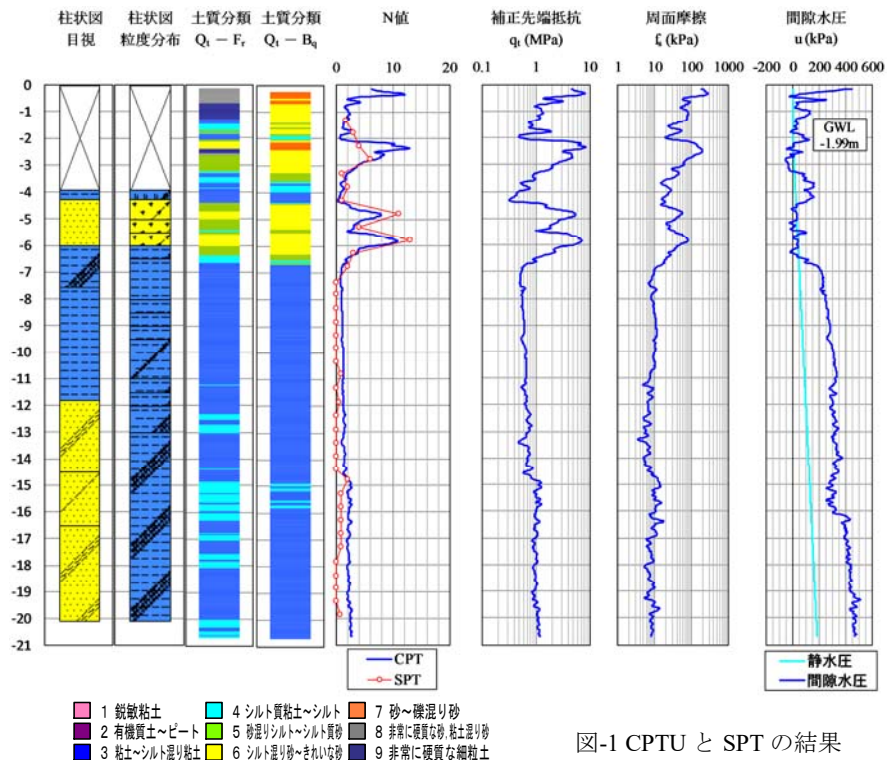


図-1 CPTU と SPT の結果

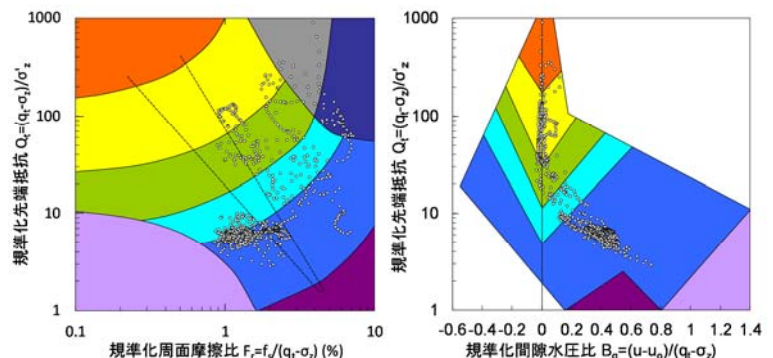


図-2 土質分類判定図

An attempt to inclined downward penetration of electric cone penetration test (Part 3 : Evaluation of cone penetration test result)

Isaku Yamamoto, Jibanshikenjo Co., Ltd.
Masayuki Shigetomi, Soil and Rock Engineering Co., Ltd.
Tomoyuki Kurihara, Chuo Kaihatsu Co., Ltd.
Nobuaki Kuge, Daiei Consultant Co., Ltd.
Hisao Tachibana, Koa Kaihatsu Co., Ltd.
Koichiro Sado, Chi-ken Sogo Consultants Co., Ltd.
Jyun Otsuka, Takara Engineering Co., Ltd.
Ken Fukasawa, JGC Corporation

CPTU から求める土質分類結果³⁾では、GL-3.90m 以浅の盛土を除き、Qt-Fr 関係、Qt-Bq 関係ともに粒度分布を考慮した柱状図と合致する結果が得られた。また、CPTU の N 値については鈴木ら⁴⁾の提案式から求めた。GL-4.8m の砂質土で N 値のピークに若干の差が生じているが、CPTU と SPT で概ね同等な N 値が得られた。

3 鉛直 CPTU と斜め CPTU の粘性土の比較

CPTU から得られた三成分データと鉛直比（斜め／鉛直）の深度分布図を図-4 に示し、斜め CPTU～鉛直 CPTU の関係と鉛直比の度数分布を図-5 に示す。比較データは、CPTU データを傾斜角から鉛直深度に補正し、三成分のデータを 5cm 毎に平均値を求めて採用した。GL-3.70m までの埋土は、砂泥互層で複雑に分布しているため、比較対象から除外した。また、図-5 は砂質土層を除外している。

図-4 の先端抵抗(q_c)、周面摩擦(f_s)、間隙水圧(u)の深度分布では、45° のデータのみ若干低い値となる傾向が見られるが、いずれの調査角度もほぼ同等な結果が得られた。

鉛直比の深度分布では GL-4.25m～GL-6.50m の砂質土層を除き、 q_c 、 f_s 、 u ともに 0.8～1.2 に分布した。測定値同様、45°/90°のみ 0.1 程度低い傾向がある。GL-6.50m～GL-11.00m の粘性土層では比較的安定した鉛直比で推移しているが、GL-4.25m～GL-6.50m の砂質土層と GL-11.0m 以深の中間土層では鉛直比のばらつきが大きくなる傾向が見られた。特に砂質土は、層厚 2.35m かつ粘性土を挟んでおり、安定した層厚を持つ砂質土層ではない。このことから、図-5 に示す三成分データの対比では砂質土層を除外し、粘性土のみで対比を行っている。

図-5 の斜め CPTU～鉛直 CPTU の関係図では非常に良い相関関係にあり、相関係数は q_c 、 f_s 、 u いずれも 0.93 以上で強い相関がある。

先端抵抗では、平均値（中央値）〔近似式の傾き〕は 75°/90°比、60°/90°比、45°/90°比で 1.00(0.97)[0.99]、1.01(0.93)[1.01]、0.98(0.89)[0.93]となり、鉛直から傾きが大きくなると q_c は小さくなる傾向が明瞭に示された。平均値と近似式の傾きはほぼ同じ値となり、調査角 45°の q_c は調査角 90°の 7%低い測定値となる。平均値と中央値の差は、図-3 に示す通り歪度が大きくなると平均値>中央値となるためである。

周面摩擦では、平均値（中央値）〔近似曲線の傾き〕は 1.12(1.09)[0.99]、1.06(1.03)[0.93]、1.00(0.93)[0.90]となった。平均値は 1.0 以上となったが、近似曲線と度数分布に着目すると近似曲線の傾きは 1.0 以下であり、度数分布の最頻値も 1.0 以下となる。これは、 f_s のばらつきが大きくなったことが原因であり、鉛直比の度数分布では尖度が低く、正規分布（尖度=0）に近い分布を示している。このことから、 f_s は近似曲線の傾きが相関値と判断する。調査角 45°の f_s は調査角 90°の平均 10%低い測定値となる。

間隙水圧では、平均値（中央値）〔近似曲線の傾き〕は 1.01(1.00)[0.95]、0.97(0.96)[0.95]、0.92(0.94)[0.94]となった。鉛直から傾きが大きくなると u は小さくなる傾向が明瞭に示されている。調査角 60°は調査角 90°より u は 3～5%低く測定され、調査角 45°では 6～8%低く測定される。

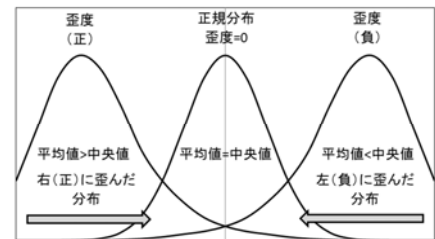


図-3 正規分布と歪度

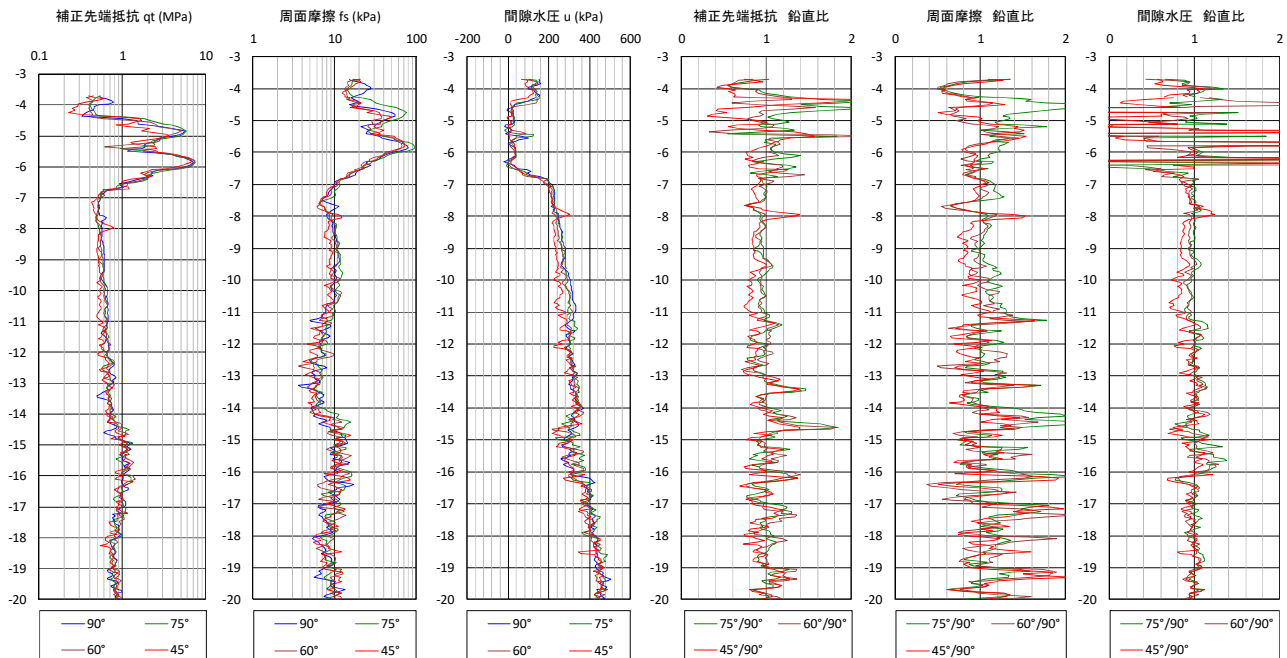
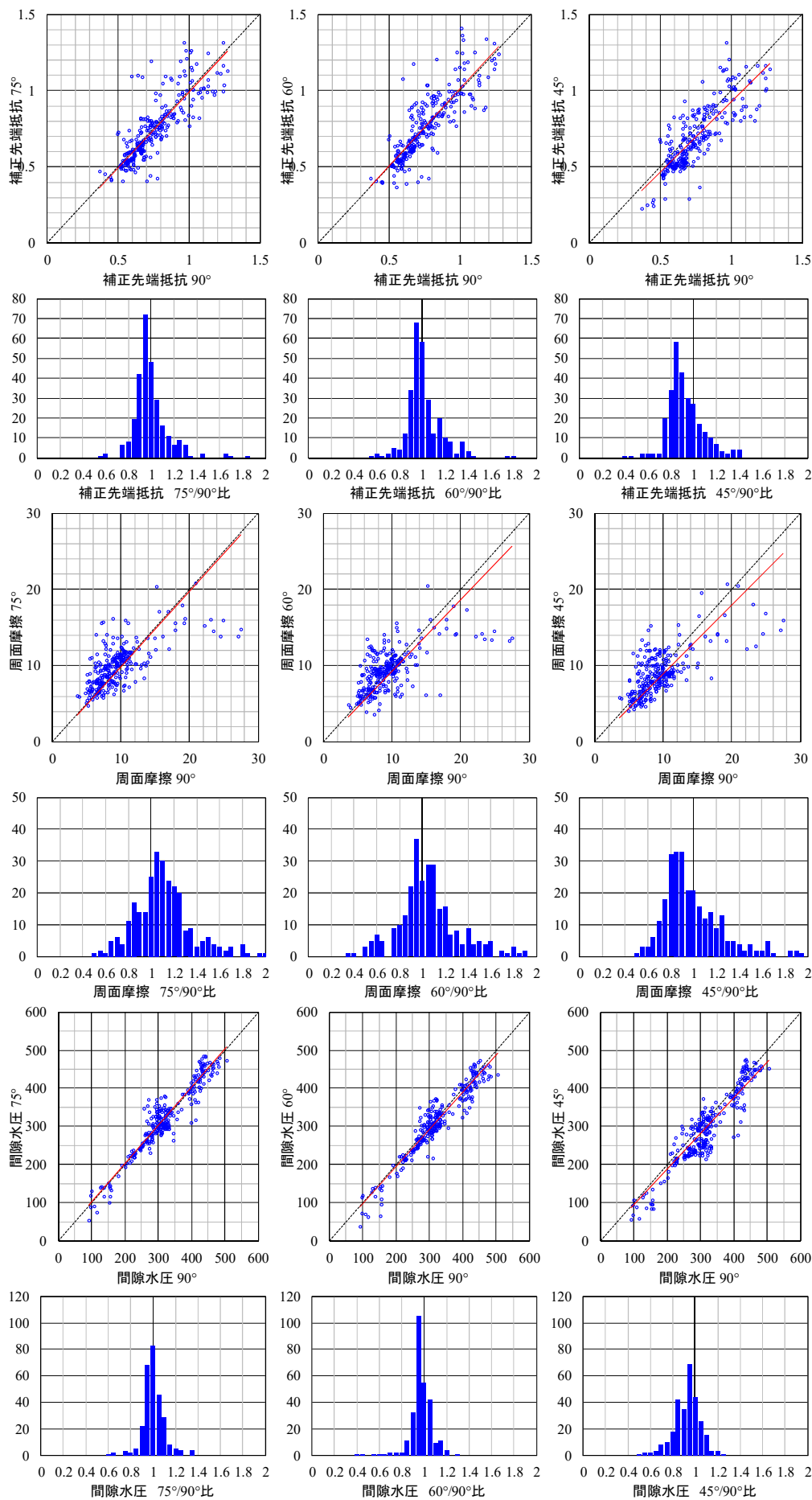


図-4 三成分データと鉛直比



赤線: 近似直線

補正先端抵抗			
	75°	60°	45°
近似式傾	0.99	1.01	0.93
相関係数	0.83	0.84	0.83
	75°/90°	60°/90°	45°/90°
データ数	282	282	282
最小値	0.55	0.55	0.42
最大値	1.84	1.81	1.39
平均	1.00	1.01	0.93
中央値	0.97	0.98	0.89
標準偏差	0.15	0.15	0.15
変動係数	0.15	0.15	0.17
尖度	6.7	4.7	1.3
歪度	1.7	1.2	0.6

赤線: 近似直線

周面摩擦			
	75°	60°	45°
近似式傾	0.99	0.93	0.90
相関係数	0.69	0.63	0.70
	75°/90°	60°/90°	45°/90°
データ数	282	282	282
最小値	0.51	0.37	0.50
最大値	2.22	2.13	2.10
平均	1.12	1.06	1.00
中央値	1.09	1.03	0.93
標準偏差	0.27	0.28	0.27
変動係数	0.24	0.26	0.27
尖度	2.4	1.3	2.1
歪度	1.1	0.7	1.3

赤線: 近似直線

間隙水圧			
	75°	60°	45°
近似式傾	1.01	0.97	0.94
相関係数	0.95	0.95	0.94
	75°/90°	60°/90°	45°/90°
データ数	282	282	282
最小値	0.58	0.42	0.51
最大値	1.37	1.29	1.24
平均	1.01	0.97	0.92
中央値	1.00	0.96	0.94
標準偏差	0.10	0.10	0.12
変動係数	0.10	0.10	0.13
尖度	3.7	7.6	1.0
歪度	0.1	-1.3	-0.5

図-5 三成分データの対比 (砂質土除外)

4 鉛直 CPTU と斜め CPTU の土質分類と N 値の比較

鉛直 CPTU と斜め CPTU から得られた土質分類と N 値の算定を図-6 に示す。

この結果、調査角 90°, 75°, 60°, 45°の土質分類、N 値ともに同等な結果が得られた。ただし、GL-11.00m 以深の中間層については Q_t - F_r 関係、 Q_t - B_q 関係ともにシルト～粘土と判定する結果となった。砂分を多く含んだ砂質シルト～砂質粘土層であったが、砂分の性状より細粒分の性状が優位にあり、N 値と土質分類の結果に現れたものと推測する。

5 まとめ

斜め調査と鉛直調査の鉛直比統計値を表-1 に示す。また、本実験で得た知見を以下に示す。

- ・ 中間土の土質判定は目視より CPTU による土質判定のほうが正確に判断することができる。
- ・ 歪度が大きくなると平均値>中央値となる。
- ・ ばらつきが大きくなると尖度が低くなり、正規分布（尖度=0）に近い分布を示す。
- ・ 調査角度が鉛直より傾きが大きくなると補正先端抵抗は小さくなる。調査角 45°の q_t は調査角 90°の q_t より 7%低い測定値となる。
- ・ 調査角度が鉛直より傾きが大きくなると周面摩擦は小さくなる。調査角 45°の f_s は調査角 90°の f_s より 10%低い測定値となる。
- ・ 調査角度が鉛直より傾きが大きくなると間隙水圧は小さくなる。調査角 60°の u は調査角 90°の u より 3～5%低く測定され、調査角 45°では 6～8%低く測定される。
- ・ 調査角 75°, 60°, 45°の土質分類と N 値は、調査角 90°とほぼ同等な結果が得られた。
- ・ CPTU の土質分類は、粒度分布による分類ではなく、砂分の性状と細粒分の性状の優位性により決定される。

本実験地盤は粘性土主体の地盤で、砂質土層は薄層かつ粘性土を挟在していたことから、本報告では調査角度毎の比較検討から砂質土を除外した。今後は、層厚のある砂質土層を対象とした斜め下方 CPTU を実施し、今回の知見を含めて再検討を行う所存である。なお、本実験では各種室内試験を実施しており、さらに詳細な検討を加えていく予定である。

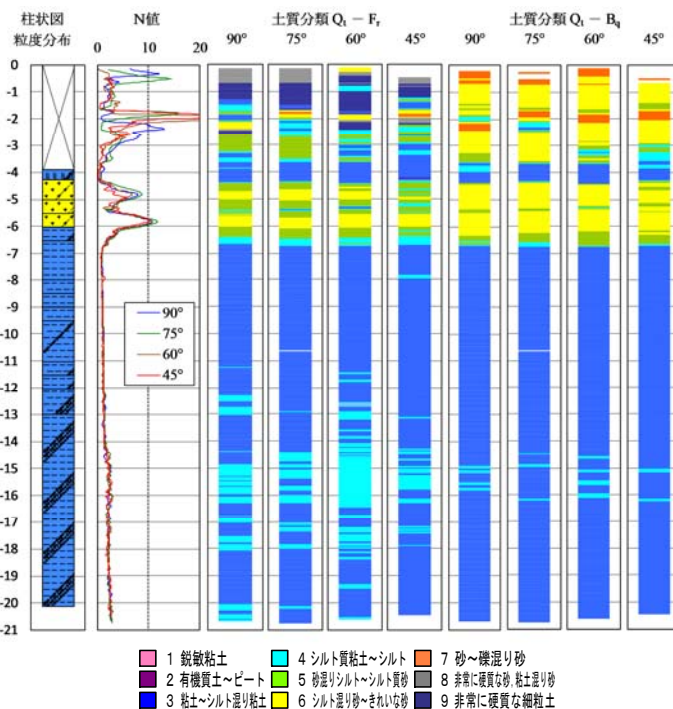


図-6 土質分類と N 値の対比

表-1 斜め調査/鉛直調査の統計値

測定データ	調査角度	対象数	平均値	中央値	近似式傾き	標準偏差	変動係数	相関係数	尖度	歪度
補正先端抵抗	75°	282	1.00	0.97	0.99	0.15	0.15	0.83	6.74	1.73
	60°	282	1.01	0.98	1.01	0.15	0.15	0.84	4.67	1.15
	45°	282	0.93	0.89	0.93	0.15	0.17	0.83	1.27	0.59
周面摩擦	75°	282	1.12	1.09	0.99	0.27	0.24	0.69	2.37	1.06
	60°	282	1.06	1.03	0.93	0.28	0.26	0.63	1.31	0.67
	45°	282	1.00	0.93	0.90	0.27	0.27	0.70	2.11	1.32
間隙水圧	75°	282	1.01	1.00	1.01	0.10	0.10	0.95	3.73	0.13
	60°	282	0.97	0.96	0.97	0.10	0.10	0.95	7.60	-1.35
	45°	282	0.92	0.94	0.94	0.12	0.13	0.94	1.04	-0.55

参考文献：

- 1) 北條豊・松浦良信・脇中康太・糸井理樹・原彰男・岡嶋眞一・片山浩明・西原聡：電気式コーン貫入試験の斜め下方貫入への試み（その 1：実証実験概要），第 14 回地盤工学会関東支部発表会（投稿中），2017.11.
- 2) 石井正紀・高橋千代丸・若月洋朗・小林優起・武政学・太田雅之・岸孝司・日下部祐基，電気式コーン貫入試験の斜め下方貫入への試み（その 2：貫入方法や所要時間等について），第 14 回地盤工学会関東支部発表会（投稿中），2017.11.
- 3) 地盤調査の方法と解説（2013）公益財団法人地盤工学会.
- 4) 鈴木康嗣，時松孝次，賓松俊明，コーン貫入試験結果と標準貫入試験から得られた地盤特性との関係，日本建築学会構造系論文集，第 566 号，73-80，2003.

電気式コーン貫入試験の斜め下方貫入への試み(その 4:ラジオアイソトープコーン貫入試験結果)

RI-CPT 斜め下方貫入 含水比

ソイルアント・ロックエンジニアリング(株)	国際会員	○後藤政昭
(株)日さく	正会員	石川恵司
(株)アサノ大成基礎エンジニアリング	正会員	大森将樹
(株)地圏総合コンサルタント	特別会員	野口浩承
北海道土質試験協同組合	特別会員	中川範彦
(株)地盤試験所	正会員	金道繁紀
川崎地質(株)	正会員	黛 廣志
中央大学	国際会員	齋藤邦夫

1. はじめに

電気式コーン貫入試験(以降、CPTU と記す)は、ボーリング調査に比べ、迅速かつ原位置にて力学、物理特性を把握することができ、地盤調査や地盤構造物の現状調査を実施する上で有効な手段である。しかし、現時点での貫入方法、結果の解釈は、鉛直下方貫入が前提である。CPTU の斜め下方貫入が可能となれば、その活用範囲は格段に広がるものとする(例えば、供用中の道路盛土の法肩や盛土小段からの調査あるいは橋脚間地盤の状況調査など)。

本試験では、鉛直(90°)および斜め下方(75°, 60°, 45°)貫入の CPTU を実施し、実際に斜め下方に貫入する方法や試験に要する時間等の確認や問題点の抽出、鉛直貫入と斜め下方貫入における試験結果の比較検討や室内土質試験結果などとの比較検討を行った。

本稿(その 4)においては、上記 CPTU と同一孔で実施したラジオアイソトープコーン貫入試験(以降、RI-CPT と記す)結果(湿潤密度、含水比)を近傍にて実施した標準貫入試験により得られた試料や近傍の別孔にてサンプリングした乱れの少ない試料にて実施した室内土質試験結果を対比した結果について報告する。

なお、試験位置等の試験概要の詳細は、参考文献 1) を参照されたい。また、本稿(その 4)における RI-CPT 結果は、参考文献 1) の試験位置図に示されるボーリング調査近傍にて実施したものである。

2. RI-CPT 概要

RI-CPT は、CPTU で計測する先端抵抗 q_c 、周面摩擦 f_s 、間隙水圧 u に加えて、ガンマ線源を利用した後方散乱型 RI 密度計コーンプローブにより湿潤密度 ρ_t 、中性子線源を利用した後方散乱型 RI 水分計コーンプローブにより含水比 w (含水量) を連続的に計測することが出来る。

後方散乱型 RI 密度計コーンプローブは、ガンマ線源コーンに内蔵したセシウム 137 (^{137}Cs) から放出されたガンマ線のうち、地中を通過して検出部に到達したガンマ線の強度と湿潤密度の関係から、地盤の湿潤密度の深度分布を計測する。図-1 に示すガンマ線源コーン+密度計プローブで線源由来のガンマ線強度+BG (バックグラウンド: 自然放射線強度) 計測を行い、別途密度計プローブと BG コーン(ガンマ線源を内蔵していないコーン)で BG を計測し、その差分である線源由来のガンマ線強度から湿潤密度を求めるものである。

本試験においては、図-1 に示す電気式コーンプローブによる CPTU を実施後、同一孔にてガンマ線源コーン+密度計プローブによるガンマ線密度検層、BG コーン+密度計プローブによる BG 検層を実施した。

また、含水比(含水量)の計測は、通常カリホルニウム 252 (^{252}Cf) の中性子線源を用いた後方散乱型 RI 水分計コーンプローブにて行う。ただし、今回は後述するが地下水位が比較的高いことから、後方散乱型 RI 密度計コーンプローブの

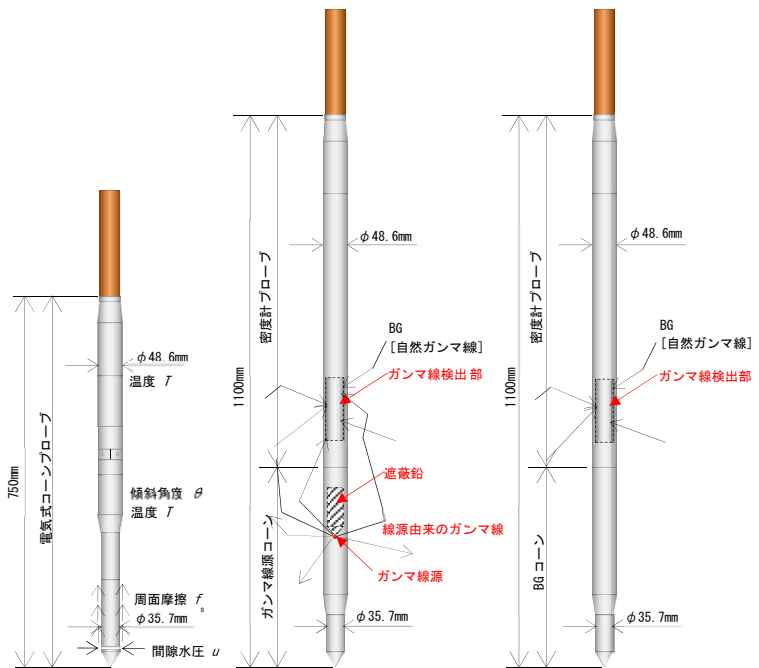


図-1 電気式コーンプローブおよび RI 密度計コーンプローブ概略図

An attempt to inclined downward
penetration of electric cone penetration
test (Part 4 : Result of Radio-Isotope
Cone Penetration Test)

Masaaki Goto Soil and Rock Engineering Co.,Ltd. ,Keiji Ishikawa NISSAKU Co.,Ltd.
Masaki Oomori ASANO TAISEIKISO ENGINEERING Co.,Ltd.
Hirotsugu Noguchi Chi-ken Sogo Consultants Co., Ltd.
Norihiro Nakagawa Hokkaido Soil Research Cooperative Association.
Shigeki Kondo Jibanshikenjo Co.,Ltd.
Hiroshi Mayuzumi Kawasaki Geological Eng. Co.,Ltd.
Kunio Saito Chuo University

貫入により得られた湿潤密度に土粒子の密度を設定し、飽和条件（通常、飽和度 $S_r=100\%$ ）から含水比を算出した。

3. 試験結果

近傍でのボーリング調査結果と CPTU 結果から試験地盤の層序は、地表から G.L.-3.90m まで盛土、その下部に層厚 0.35m の有機質土が存在する。G.L.-4.25m～G.L.-6.00m は砂質土層で、G.L.-6.00m 以深は非常に軟らかい粘性土であることを確認している。なお、試験実施時の地下水位は G.L.-1.99m であった²⁾。

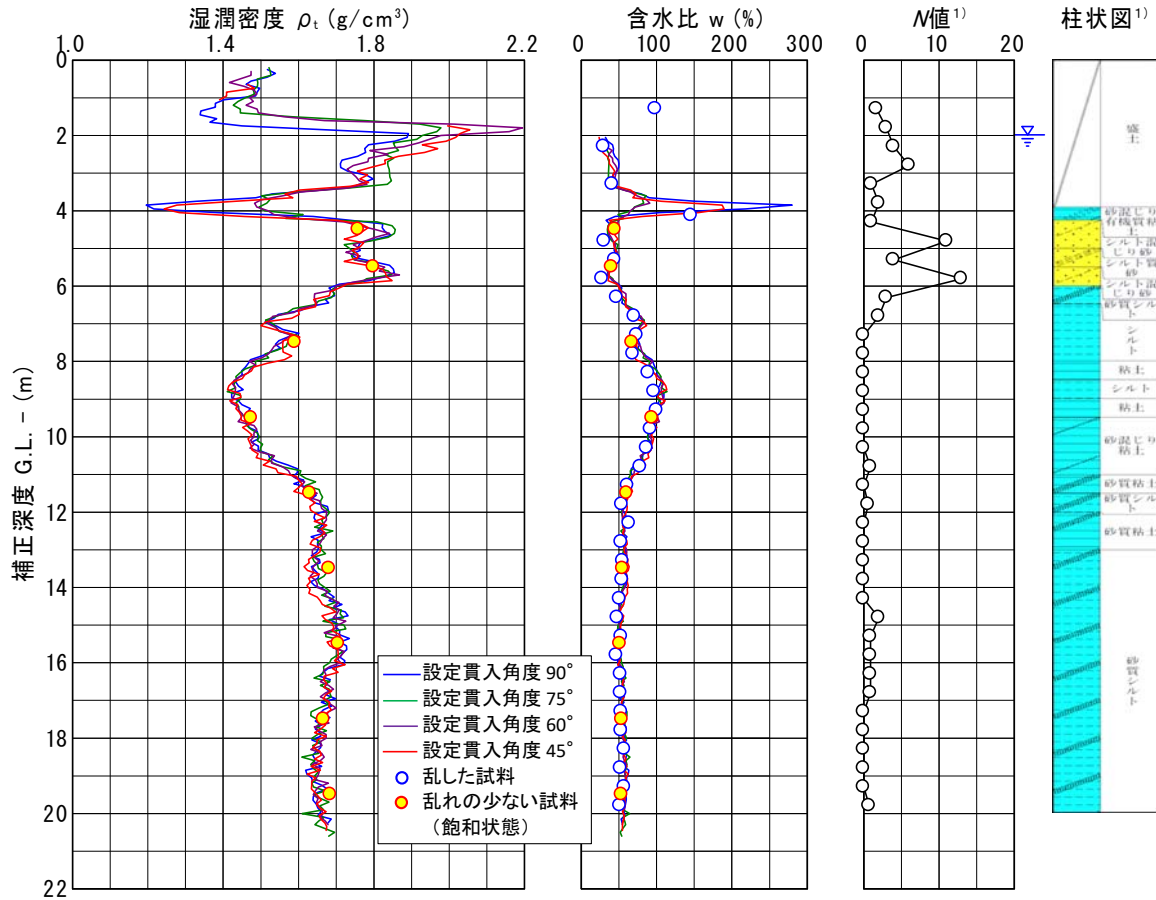


図-2 RI-CPT 計測結果

図-2 は、RI-CPT で計測した鉛直 (90°) 貫入および斜め下方貫入 (75° , 60° , 45°) の湿潤密度、含水比の深度分布である。図中の深度補正は、CPTU の貫入時の傾斜角度にて補正した深度である。これらの図には、標準貫入試験により得られた乱した試料の炉乾燥含水比、別孔にてサンプリングした乱れの少ない試料の湿潤密度、炉乾燥含水比をプロットしている。ただし、柱状図に示す砂質土層の乱れの少ない試料の湿潤密度、含水比は、室内試験より得られた乾燥密度と土粒子の密度を基に算出した飽和密度、飽和含水比である。RI-CPT で計測した湿潤密度から含水比を算出する際に使用した土粒子の密度は、G.L.-3.90m～G.L.-4.25m の有機質土層を 2.300g/cm^3 とし、それ以外は 2.650g/cm^3 とした（室内土質試験結果より）。

図-3 は、RI-CPT により計測した鉛直 (90°) 貫入と斜め下方貫入 (75° , 60° , 45°) の湿潤密度（深度 0.5m 毎の区間平均値）の関係図である。

図-2, 3 より、地表から G.L.-3.90m までの盛土層と G.L.-3.90m～G.L.-4.25m の有機質土層で試験結果に貫入角度による差異が窺える。これは、貫入角度の影響ではなく、試験位置（貫入箇所）の性状（土質材料、締固め状態など）の差異が原因と考える。同様に有機質土層の差異も試験位置（貫入箇所）の性状の差異によるものとする。G.L.-4.25m 以深は、貫入角度に関係なく良く一致しており、貫入角度による計測値への影響はほとんどないものとする。

図-4 は、図-2 に示す柱状図のうち、砂質土層（G.L.-4.25m～G.L.-6.00m）の RI-CPT 計測結果（採取深度に相当する値）、乱した試料および乱れの少ない試料の含水比の関係を示すものである。乱れの少ない試料の含水比と計測結果は非常に良く一致しているが、乱した試料の含水比は、

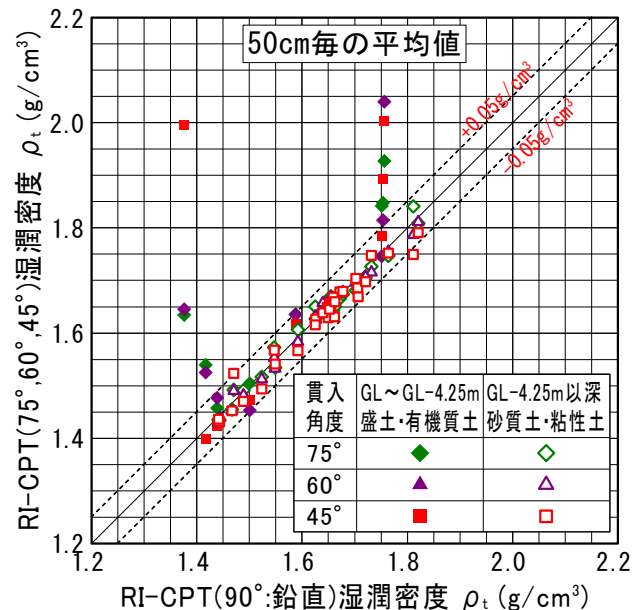


図-3 90°（鉛直）貫入時と傾斜貫入時の RI-CPT の湿潤密度

乱れの少ない試料の含水比および RU-CPT 計測結果より低い値となっている。これは、標準貫入試験でレイモンドサンプラーを動的貫入した際の試料圧縮による脱水や、レイモンドサンプラーを地上に引き上げる際にサンプラー内の試料からの逸水が原因であると考え³⁾。

図-5～図-7 に RI-CPT 計測値（採取深度に相当する値）と乱した試料、ならびに乱れの少ない試料の試験結果の関係を示す。乱した試料の有機質土層と砂質土層に相当する結果に差異が見られることを除けば、貫入角度の違いによる測定結果の差異は見られなかった。

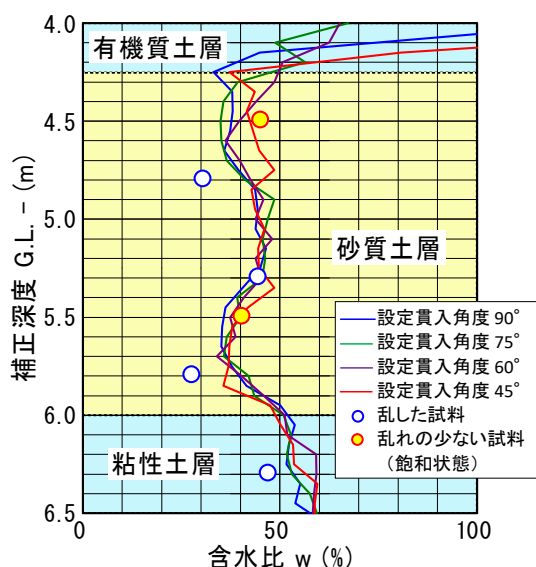


図-4 砂質土層の計測結果

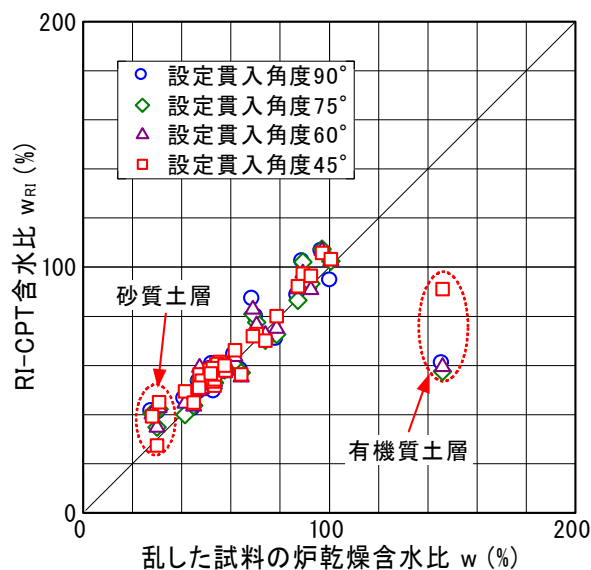


図-5 RI-CPT と乱した試料の含水比の関係

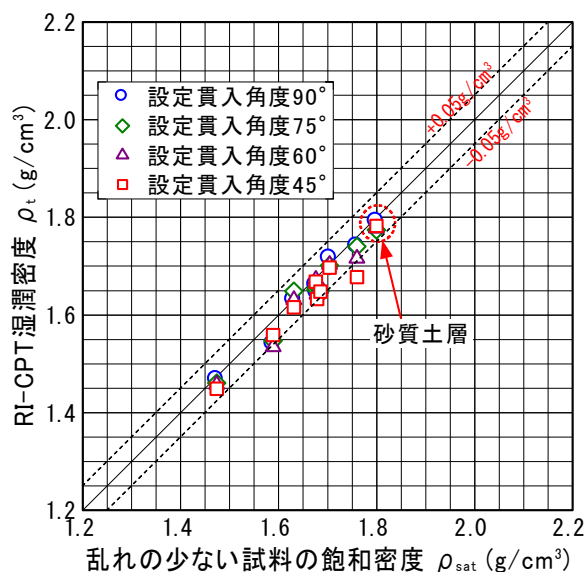


図-6 RI-CPT と乱れの少ない試料の飽和密度の関係

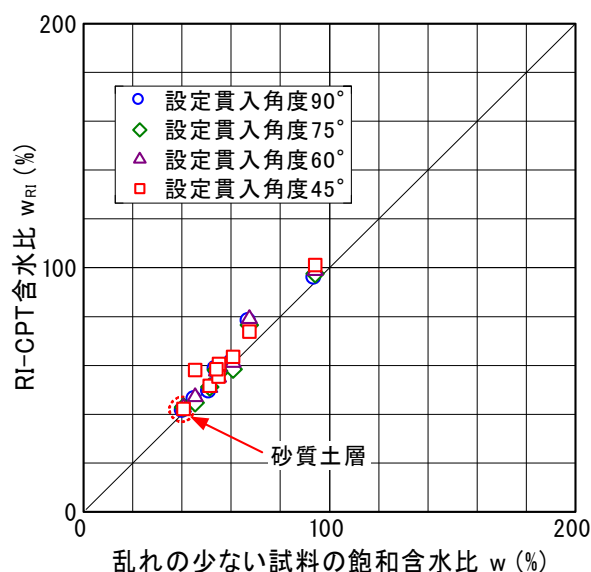


図-7 RI-CPT と乱れの少ない試料の含水比の関係

4. まとめと今後の課題

RI-CPT による結果は、地点間の土層性状の差を除けば、貫入角度による影響がほとんどなく、有機質土層、砂質土層を除く乱した試料、乱れの少ない試料の室内土質試験結果と非常によく一致していることが確認できた。

なお、今回試験を実施した地盤は、軟弱な粘性土層が大半を占め、レイモンドサンプラーを地上に引き上げる際になどに含水比が低下し易い砂質土層が薄層であった。今後は、今回試験を行った地盤よりも強固な地盤（ N 値が比較的高く、多少の礫分を含むような地盤）や砂質土層が主体の地盤を対象に斜め下方貫入による試験を実施し、今回確認した事象を改めて検証していく必要がある。

参考文献

- 1) 北條豊・松浦良信・脇中康太・糸井理樹・原彰男・岡嶋眞一・片山浩明・西原聡：電気式コーン貫入試験の斜め下方貫入への試み（その1：実証実験概要）、第14回地盤工学会関東支部発表会（投稿中）、2017.11
- 2) 山本伊作・重富正幸・栗原朋之・久下信明・橘久生・佐渡耕一郎・大塚潤・深沢健：電気式コーン貫入試験の斜め下方貫入への試み（その3：電気式コーン貫入試験結果の評価）、第14回地盤工学会関東支部発表会（投稿中）、2017.11
- 3) 越山賢一：砂質土の標準貫入試験試料の含水比に対する検討、全地連「技術e-フォーラム2006」名古屋、論文No.76、2006.

電気式コーン貫入試験の斜め下方貫入に関する研究(その1：実証実験概要)

電気式コーン貫入試験 斜め下方貫入 実証実験

川崎地質(株) 正会員 ○脇中康太, 黛廣志

中央開発(株) 正会員 西原聡

(株)プラテック 正会員 日下部祐基

(株)タカラエンジニアリング 正会員 大塚潤

ソイルアンドロックエンジニアリング(株) 国際会員 後藤政昭

(株)地盤試験所 正会員 金道繁紀

1.概要

電気式コーン貫入試験(以降, CPTU と記す)¹⁾はボーリング調査に比べ迅速, かつ原位置にて力学・物理特性を把握することができ, 地盤調査を実施する上で有効な手段である。ただし, 貫入方法や結果の解釈は鉛直貫入が前提である。CPTU の斜め下方貫入が有効となれば, 図-1 に示す盛土の法肩や法尻, 盛土小段からの調査, あるいは既設構造物下部の地盤調査など, その活用範囲は格段に広がるものと考えられる。

本実験では, 鉛直(90°)および斜め下方(75° , 60° , 45°)の CPTU とラジオアイソトープコーン貫入試験(以降, RI-CPT と記す)を実施し, 標準貫入試験(以降, SPT と記す)や室内土質試験結果と比較するとともに, 斜め下方貫入 CPTU 調査方法の測定精度と解釈の検証を行った。また, CPTU の斜め下方方向の地盤調査手法を確立するとともに, 適用範囲を明らかにした。本稿(その1)では, 実証実験の概要について報告する。

2.調査内容

調査内容を表-1 に示す。本実験では CPTU と RI-CPT について, 鉛直(90°)と斜め下方(75° , 60° , 45°)の4角度で実施した。調査深度は鉛直距離で20mとした。また, 現地盤を確認する目的で, SPT とサンプリング及び室内土質試験を実施した。なお, 調査角度による積算補正係数を設定する能率調査として, 各調査角度の作業時間を記録した。

3.調査位置

調査位置の平面図及び断面図を図-2 に示す。また, 断面図には SPT の結果を併記した。本実験では, 調査範囲内の土層の相違が結果に影響を及ぼすことが無いよう, 調査範囲が最小限となるよう配置した。また, 鉛直 CPTU は標準データとする中央部①と 45° 調査の先端部の土層が確認できる位置②の2箇所を実施して土層の相違を確認した。

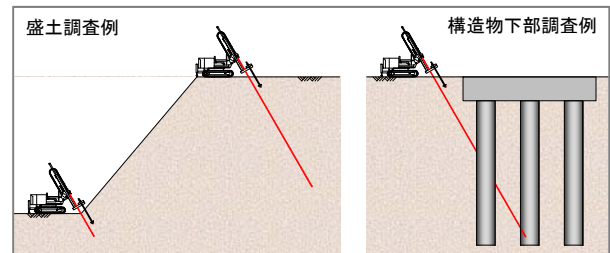


図-1 斜め下方貫入 CPTU の活用例

表-1 調査内容

調査内容	調査深度		備考
	鉛直距離	斜距離	
CPTU RI-CPT	90°	20.0m	2地点
	75°	20.0m	20.7m 1地点
	60°	20.0m	23.1m 1地点
	45°	20.0m	28.3m 1地点
鉛直SPT	20.0m	—	0.5m間隔
サンプリング	20.0m	—	砂質土2深度, 粘性土14深度
室内土質試験	ベネ試料, サンプリング試料		
能率調査	調査角度による作業時間		

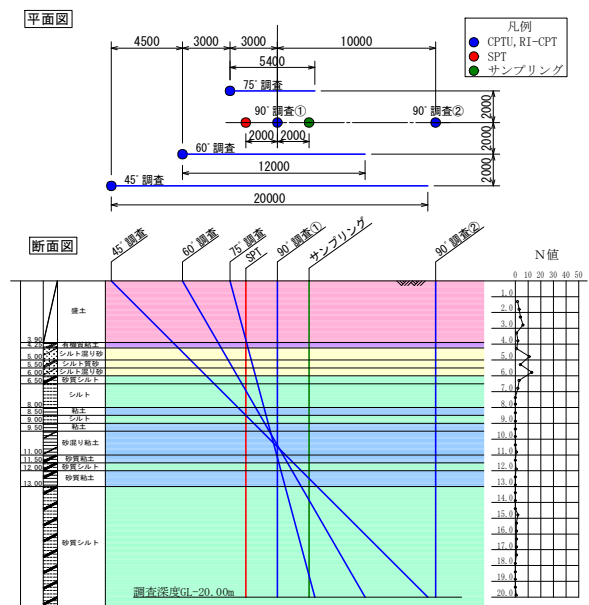


図-2 調査位置

Studies on inclined downward penetration
of CPT (Part1: Outline of investigation)

Kota Wakinaka (Kawasaki Geological Engineering Co., Ltd.)

Hiroshi Mayuzumi (Kawasaki Geological Engineering Co., Ltd.)

Satishi Nishihara (Chuo Kaihatsu Co., Ltd.), Yuki Kusakabe (Platech Co., Ltd.)

Jyun Ootsuka (Takara Engineering Co., Ltd.)

Masaaki Goto (Soil and Rock Engineering Co., Ltd.)

Shigeki Kondou (Jibanshikenjo Co., Ltd.)

4.調査方法

本実験で使用した貫入装置は、Geoprobe 社製 6610DT である。削孔+SPT が可能であり、同一機械で CPTU・SPT・RI-CPT・サンプリングを実施した。CPTU は、貫入速度を 20mm±5mm/秒としており¹⁾、本実験においては、斜距離で 20mm/秒となるよう圧入した。また、斜め下方貫入 CPTU・RI-CPT 測定データは、図-3 に示す通り、貫入深度 D 及び貫入角度 θ を用いて補正深度 D_m と水平移動量 δ_m を算出した。

5.室内土質試験

室内土質試験は、乱れの少ない試料と SPT で採取した乱した試料を用いて実施した。室内土質試験の内容を表-2 に示す。表層の埋土層を除いて 50cm 間隔で採取した SPT の試料を用いて、各種物理試験を実施した。乱れの少ない試料は、粘性土層を対象に一軸圧縮試験・三軸(UU)試験・圧密試験を実施し、砂質土層を対象に三軸(CD)試験を実施した。また、細粒分含有率 F_c が、20%< F_c <50%の場合は、三軸(CU)試験を実施し、一軸圧縮試験を実施する試料については一面せん断試験(圧密定体積)を実施した。

土の強度異方性は、粒子の配向性による堆積構造の固有異方性と、鉛直方向の有効土被り圧 σ'_{v0} と水平方向の静止土圧 $K_0\sigma'_{v0}$ の異方的な応力状態による誘導異方性の影響を受けていると言われている。本試験においては、土の異方性を一軸圧縮試験で確認することとし、図-4 に示すように 75°、60°、45° の角度で $\phi 15\text{mm}$ 、 $L=30\text{mm}$ の供試体を作製し、小径供試体による一軸圧縮試験を実施した。

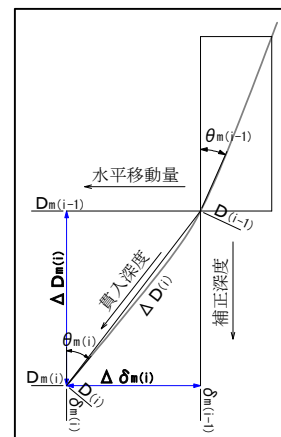


図-3 貫入角度による補正

表-2 室内土質試験内容

土質名	試料番号	深度 (m)	物理試験				試料番号	深度 (m)	物理試験				力学試験				
			土粒子の密度	含水比	粒度試験 (ふるい+沈降)	液性限界・塑性限界			土粒子の密度	含水比	粒度試験 (ふるい+沈降)	液性限界・塑性限界	湿潤密度	一軸圧縮	三軸圧縮(UU)	三軸圧縮(CD)	三軸圧縮(CUB)
FI	P1	1.15~1.45m	○	○	○	○											
	P2	2.15~2.45m	○	○	○	○											
	P3	3.15~3.45m	○	○	○	○											
OH-S	P4	4.00~4.25m	○	○	○	○	D1	4.00~5.00m	○	○	○		○		○		
S-M	P5	4.65~4.95m	○	○	○	○							○				
SM	P6	5.15~5.45m	○	○	○		D2	5.00~6.00m	○	○	○		○		○		
S-M	P7	5.65~5.95m	○	○	○								○				
MS	P8	6.15~6.45m	○	○	○	○											
	P9	6.65~6.95m	○	○	○	○											
M	P10	7.15~7.45m	○	○	○	○											
	P11	7.65~7.95m	○	○	○	○	T1	7.00~8.00m	○	○	○	○	○	○		○	
C	P12	8.15~8.45m	○	○	○	○											
M	P13	8.65~8.95m	○	○	○	○	T2	8.00~9.00m	○	○	○	○	○	○			○
C	P14	9.15~9.45m	○	○	○	○											
	P15	9.65~9.95m	○	○	○	○	T3	9.00~10.00m	○	○	○	○	○	○		○	
C-S	P16	10.15~10.45m	○	○	○	○											
	P17	10.65~10.95m	○	○	○	○	T4	10.00~11.00m	○	○	○	○	○	○			○
CS	P18	11.15~11.45m	○	○	○	○											
	P19	11.65~11.95m	○	○	○	○	T5	11.00~12.00m	○	○	○	○	○	○		○	
MS	P20	12.15~12.45m	○	○	○	○											
CS	P21	12.65~12.95m	○	○	○	○	T6	12.00~13.00m	○	○	○	○	○	○			○
MS	P22	13.15~13.45m	○	○	○	○											
	P23	13.65~13.95m	○	○	○	○	T7	13.00~14.00m	○	○	○	○	○	○		○	
	P24	14.15~14.45m	○	○	○	○											
	P25	14.65~14.95m	○	○	○	○	T8	14.00~15.00m	○	○	○	○	○	○			○
	P26	15.15~15.45m	○	○	○	○											
	P27	15.65~15.95m	○	○	○	○	T9	15.00~16.00m	○	○	○	○	○	○		○	
	P28	16.15~16.45m	○	○	○	○											
	P29	16.65~16.95m	○	○	○	○	T10	16.00~17.00m	○	○	○	○	○	○			○
	P30	17.15~17.45m	○	○	○	○											
	P31	17.65~17.95m	○	○	○	○	T11	17.00~18.00m	○	○	○	○	○	○		○	
	P32	18.15~18.45m	○	○	○	○											
	P33	18.65~18.95m	○	○	○	○	T12	18.00~19.00m	○	○	○	○	○	○			○
	P34	19.15~19.45m	○	○	○	○											
	P35	19.65~19.95m	○	○	○	○	T13	19.00~20.00m	○	○	○	○	○	○		○	

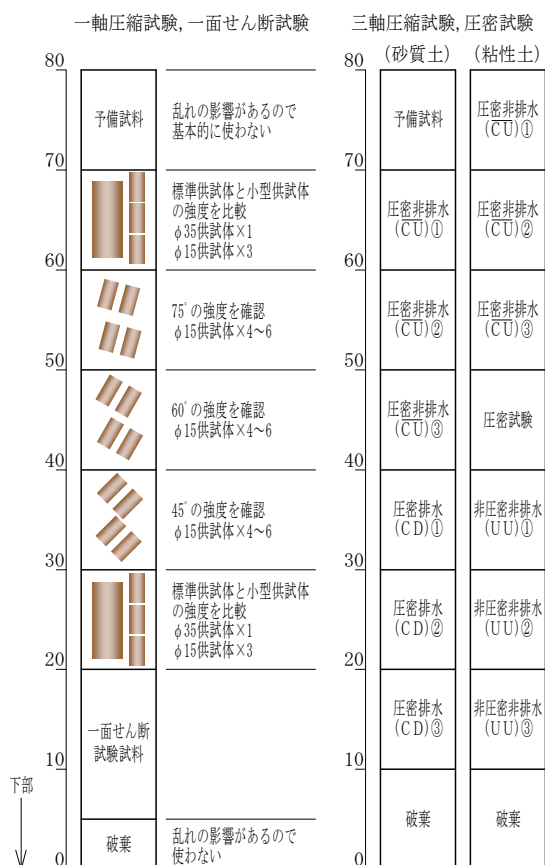


図-4 室内試験位置

6.まとめ

本実験では、斜め下方の CPTU と RI-CPT を実施するとともに、詳細な SPT と室内土質試験を実施した。本稿は実証実験概要として、斜め CPTU と RI-CPT 及び室内土質試験の方法について詳述した。

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。

電気式コーン貫入試験の斜め下方貫入に関する研究 (その2：実績とこれからの利用)

電気式コーン貫入試験 斜め下方貫入 活用方法

(株)地圏総合コンサルタント 正会員 ○中川清森
(株)地圏総合コンサルタント 特別会員 佐渡耕一郎
(株)地圏総合コンサルタント 特別会員 相澤明宏
基礎地盤コンサルタンツ(株) 正会員 武政 学
(株)地盤試験所 正会員 高橋千代丸
ソイルアント・ロックエンジニアリング(株) 国際会員 後藤政昭
中央大学 国際会員 齋藤邦夫

1.はじめに

電気式コーン貫入試験は、様々な分野の土質調査において、国際的にも利用頻度の高い調査手法の一つである。国内でも、「三成分コーン」の俗称で、詳細な地盤性状を把握する際の一手法として利用事例は多かったが、今回、国内においては初めて斜め下方への貫入試験を試行し、その有効性を検証したことにより、その活用範囲はさらに拡大することが期待される。

本報告では、斜め下方貫入試験に関する海外での既往研究成果をレビューすると共に、①供用中の道路・鉄道盛土調査での活用、②河川堤防調査での活用、③既設構造物・建築物直下地盤調査での活用等を題材として、その有効活用方法や可能性・課題について提言を行う。

2.既往研究のレビュー

2.1 既往の研究事例

電気式コーン貫入試験(CPTU)は、軟質の堆積物からなる沖積層において、原位置での地盤特性を測定するために過去数十年間にわたって広く使用されてきた。CPTUは、標準形状(直径3.57cm、先端角60°の円錐)を有するプローブを、20±5mm/secの速度で土中に押し込み、先端抵抗、周面摩擦、間隙水圧の測定値を得るものである。測定は、通常は表層から鉛直方向に行われ、層区分と地盤特性に関する情報を得ることができる。現在、鉛直方向のCPTUを実施するために使用される装置は、斜め方向にCPTU(ICPT)を実施するために改良することが可能であるが、得られた情報の解釈は解明されていない状況である。以下に、水平および斜めCPTUに関する3編の既往研究成果について記す。

Broere and van Tol (1998)¹⁾は、密度の異なる砂質土を作製し、鉛直/水平CPTUを実施した。この結果、中程度に密な砂では水平先端抵抗値は、鉛直先端抵抗値よりも最大20%高い事を見出し、空洞拡張モデルにより解説を行った。

さらに、Broere and van Tol (2001)²⁾は、砂地盤の相対密度や細粒分含有量に着目し、粒度分布と相対密度が異なる3つの砂地盤を作製して鉛直/水平CPTUを実施した。この結果、1998年の研究で結論付けた中程度の密度のときに先端抵抗の水平/鉛直比は最大1.2となるという傾向は、本研究のデータでは完全には実証されなかったが、一方で、周面摩擦と摩擦比(f_s/q_t)の水平/鉛直比は、平均粒径 D_{50} が大きくなると明らかに減少することが分かった。

Wei, Tumay, Abu-Farsakh (2005)³⁾は、鉛直コーン貫入試験(CPTv)と傾斜コーン貫入試験(ICPT)の先端抵抗と周面摩擦の測定値が異なる原因を調べるために、米国ルイジアナ州の3つの調査地点で、粘性土に対するミニチュアコーンを用いたCPTvとICPTの実験を実施した。また、空洞拡張モデルに基づき、静止土圧係数が $K_0 > 1$ の場合は貫入角が増加すると先端抵抗、周面摩擦は低下し、 $K_0 < 1$ の場合は貫入角が増加すると先端抵抗、周面摩擦は増加すると予測した。検証の結果、 $K_0 > 1$ の土層では、貫入角が増加すると予想通り先端抵抗は低下したが、周面摩擦は貫入角に相関した結果は得られなかった。一方、 $K_0 < 1$ の土層では、1つの調査地点を除いて、貫入角が増加すると予想通り先端抵抗、周面摩擦ともに増加した。ただし、貫入角45°では周面摩擦が急激に低下する現象が見られ、その原因は不明としている。

2.2 既往研究レビューのまとめ

以上の既往研究成果から、CPTUを斜め方向に実施する際には、地盤の粒度特性や静止土圧係数に加え、土の強度に関する異方性の有無を評価する必要があるものとする。強度に関する異方性は、粒子の配向性による堆積構造の固有

Studies on inclined downward penetration of CPT
(Part2: Achievements and future use)

Seishin Nakagawa : Chi-ken Sogo Consultants Co., Ltd.
Koichiro Sado, : Chi-ken Sogo Consultants Co., Ltd.
Akihiro Aizawa, : Chi-ken Sogo Consultants Co., Ltd.

Manabu Takemasa : Kiso-Jiban Consultants Co., Ltd., Chiyomaru Takahashi : Jibanshikenjo Co., Ltd.

Masaaki Goto : Soil and Rock Engineering Co., Ltd., Kunio Saito : Chuo University.

異方性と、鉛直方向の有効土被り圧 σ'_{v0} と水平方向の静止土圧 $K_0\sigma'_{v0}$ の異方的な応力状態による誘導異方性との影響を受けていると言われている。しかし、上記研究事例では、空洞拡張モデルにより斜め CPTU の測定値は傾斜角による初期応力で変化するものの、粘着力とコーン指数は貫入角に依存せず一律としている。こうしたことから、応力状態による誘導異方性のみではなく、堆積構造に起因する固有異方性も含めた評価を行う必要があるものと考えられる。

3. CPTU のこれからの利用

3. 1 CPTU の有効性

CPTU は通常の鉛直ボーリング調査に比べ迅速、かつ原位置試験にて多様な力学・物理特性（表 3.1 参照）を把握することができる。また、CPTU の斜め下方調査を実施すれば、通常の鉛直ボーリング調査では実施が困難な場所でも調査が可能となり、地盤調査の実施適用範囲が広がることが期待できる。

3. 2 CPTU の活用例

上記で述べた多様な地盤情報を取得できること、斜め下方 CPTU を利用することで通常の鉛直ボーリング調査では実施が困難な場所で地盤調査が実施することができるといった CPTU の有効性を活用することで、様々な場所で多様な地盤評価を行える可能性がある。CPTU の今後の有効な活用例を以下に述べる。

(1) 盛土での活用例

道路や鉄道の盛土調査を実施する際、斜め下方 CPTU を活用することで道路の規制を行うことなく、また、鉄道の営業時間内においても調査を行うことが可能となり、盛土の地盤構成や盛土下部の液状化・流動化の情報を容易に取得することができる。

また、築堤履歴が複雑な河川堤防では図 3.1 に示すように天端や小段などの複数箇所から斜め方向の調査を行うことにより、複雑な堤体構造を詳細に把握することが可能となる。

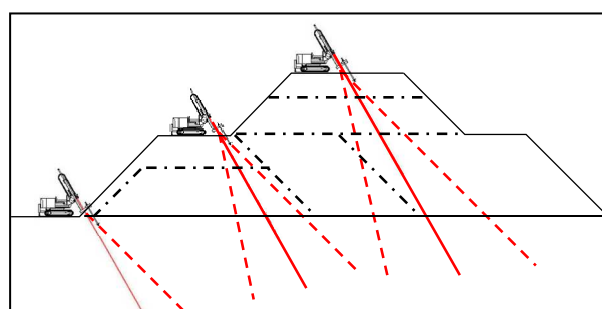


図 3.1 河川堤防での斜め下方 CPTU 活用例

(2) 既設構造物での活用例

橋梁や石油タンク、戸建宅地などの構造物は、撤去が出来ないためその直下の鉛直調査が不可能である。しかし、構造物の近傍から斜め下方 CPTU を活用（図 3.2）することで、構造物の解体・撤去をすることなく構造物直下の土質構造や空洞の有無、液状化の評価、支持力の評価を実施することが可能となる。また、既設杭基礎間においても、斜め下方 CPTU を活用することで杭を避けて杭間の地盤状況や物性、空洞の有無等を確認することができる。

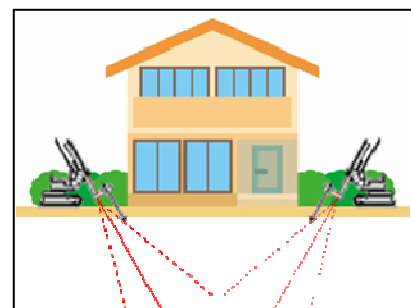


図 3.2 既設構造物での斜め下方 CPTU 活用例

(3) その他の活用例

河川や湖沼、港湾の底質調査を実施するには、通常台船や足場仮設が必要となるが、斜め下方 CPTU を図 3.3 に示すように陸地の近い地点から斜め下方方向の調査を実施することで台船や足場仮設が不要となり、迅速かつ安価に有効なデータを取得することが可能となる。

また、改良体周囲より改良体に向かって斜め下方に調査することで、改良体を損傷させずに先端抵抗と間隙水圧の上昇を把握し、改良体の施工状況や効果を確認することができる。

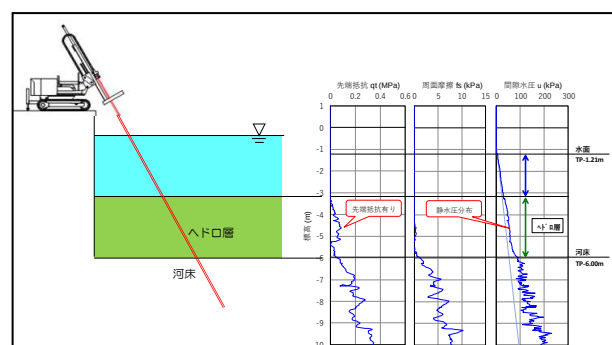


図 3.3 底質調査での斜め下方 CPTU の活用例

4. おわりに

CPTU は多様な地盤情報を取得することができ、地盤調査を実施する上で有効な手段であり、さらに斜め下方 CPTU を活用することで、通常の鉛直調査では実施が困難な箇所でも地盤情報を世界標準で取得することができる。

今後も、既往研究の成果や課題、今回実施した検証事例の成果を踏まえつつ、引き続き CPTU の活用事例を増やし、斜め下方 CPTU の有効性を実証していきたい。

<参考文献>

- 1) Broere, W. and Van-Tol, A. F., 1998, Horizontal Cone Penetration Testing, Geotechnical Site Characterization, Proceedings ISC'98, Robertson and Mayne, Eds., Rotterdam, pp. 989-994.
- 2) Broere, W. and Van-Tol, A. F., 2001, Horizontal Cone Penetration Testing in sand, Proceedings of the International Conference on In Situ Measurement of Soil Properties and Case Histories, Bali, Indonesia, pp.649-654.
- 3) Lei Wei, Mehmet T. Tumay, Murad Y. Abu-Farsakh, 2005, Field Testing of Inclined Cone Penetration, Geotechnical Testing Journal, Vol. 28, No. 1

電気式コーン貫入試験の斜め下方貫入に関する研究(その3:積算に関わる所要時間等について)

電気式コーン貫入試験 斜め下方貫入 試験時間

ソイルアントロックエンジニアリング(株)	正会員	○松浦良信
同上	正会員	石井正紀
(株)日さく	正会員	石川恵司
同上	正会員	堺田佳人
(株)地盤試験所	正会員	北條 豊
同上	正会員	山本伊作

1. はじめに

電気式コーン貫入試験(以降, CPTU と記す)は, ボーリング調査に比べ, 迅速かつ原位置にて力学, 物理特性を把握することができ, 地盤調査, 土構造物およびその下位の地盤などの現状調査において有効な手段である。しかし, 現時点で CPTU は鉛直下方貫入が前提である。斜め下方貫入が可能となれば, その活用範囲は格段に広がるものと考えられる。

本研究は, CPTU の新たな可能性を見出すことを目的として, 鉛直(90°)貫入が前提である CPTU を斜め下方(75° , 60° , 45°)に貫入し, 斜め下方へ貫入するための方法や所要時間, 鉛直貫入や室内土質試験結果等との比較などを行った。

本稿(その3)では, 斜め下方貫入に必要な治具, スクリューアンカーの設置方法などを紹介する。加えて, 通常の鉛直貫入に対して斜め下方に貫入した場合のスクリューアンカー設置等の所要時間や試験の所要時間等を確認し, これらに基づく斜め下方貫入 1m あたりの鉛直貫入試験単価(標準試験単価)に対する割増比(案)を提案する。

なお, 試験位置等の実験概要の詳細については, 参考文献 1) を参照されたい。

2. 試験準備

CPTU は, 図-1 に示す自走式専用貫入車等により鉛直下方にコーンプローブを静的に貫入しながら, コーン貫入抵抗 q_c , 周面摩擦 f_s , 間隙水圧 u を深度方向に連続測定する試験である(q_c , f_s , u 以外にも貫入時のコーンプローブの傾斜角度, 温度の測定も行っている)。今回実験に用いた自走式専用貫入車は車両質量約 2,200kg であるが, 写真-1 に示すスクリューアンカーに延長ロッドを継ぎ足して図-1 に示すように設置することで, 地盤の状態にもよるが最大で 165kN の貫入力を得ることができる。

本実験では, 車両質量のみでは貫入時の反力不足が懸念されたため鉛直貫入同様, スクリューアンカーに延長ロッドを継ぎ足して設置することとした。ただし, 本実験における斜め下方貫入のスクリューアンカーは, 図-2 に示すようにコーンプローブの設定貫入角度と同等の角度で設置した。

スクリューアンカーの設置は, 自走式専用貫入車のスクリューアンカー設置装置を所定の設置角度(≡貫入角度)に傾け, 写真-2 に示す治具を自走式専用貫入車に取付けて角度を保持できるように工夫した。スクリューアンカー等の設置(貫入試験を実施するにあたっての準備作業完了まで)に必要な時間は, 鉛直貫入を基準とした場合, 表-1 に示すように鉛直からの傾きが大きくなるにつれ設置時間が多くかかることが確認できた。加えて, 必然ではあるがスクリューアンカーの設置角度の傾きが大きくなるにつれてスクリューアンカーの延長ロッドの本数も多く必要となることも確認できた。

3. 試験の所要時間等について

CPTU の所要時間等についてまとめたものを表-2 に示す。貫入角度が 90° (鉛直)と同等の貫入長の試験を斜め下方貫入で実施する場合, 貫入速度, 貫入角度が一定であれば貫入角度の傾きが大きくなるにつれ同一深度に達するまでの貫入長は長くなり, 貫入用ロッドの継ぎし作業などを含めた貫入に要した全ての時間(以降, 試験時間と記す)もその分

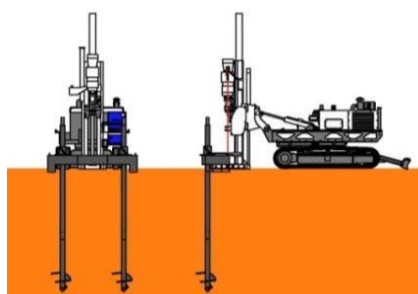


図-1 鉛直貫入時のスクリューアンカー設置状況(概略)

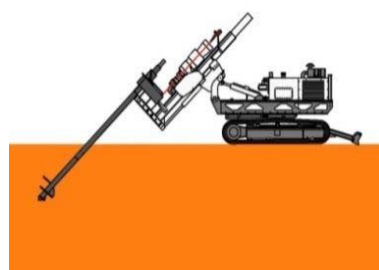


図-2 斜め下方貫入時のスクリューアンカー設置状況(概略)



写真-1 スクリューアンカーと延長ロッド



写真-2 スクリューアンカーガイド

表-1 鉛直 (90°) 設置に対する時間比他

設置角度 ($^\circ$)	実測角度($^\circ$)			鉛直 (90°) に 対する時間比
	右側	左側	平均値	
90(鉛直)	—	—	—	1.00
75	66.8	64.9	65.9	2.23
60	62.0	57.7	59.9	2.65
45	45.0	46.0	45.5	3.85

長くなると考える。

今回試験を実施した各設定貫入角度における貫入長を 90° (鉛直) を基準として対比すると、設定貫入角度 75°、60°、45° の順に 1.03 倍、1.17 倍、1.52 倍となる(因みに、鉛直距離 1m を一定の貫入角度 75°、65°、45° で斜め下方に貫入した場合の斜距離はそれぞれ、1.04m、1.15m、1.41m となる)。また、90° (鉛直) を基準とした実際の試験時間を対比すると、設定貫入角度 75°、60°、45° の順に 0.97 倍、1.17 倍、1.28 倍となる。

これらの結果から、鉛直貫入と斜め下方貫入の試験時間の差異は、斜め下方貫入による作業の煩雑さや手間の増加などによるものはほとんどなく、大半が貫入長の差異によるものであることがわかる。しかし、貫入長比と実際の試験時間比を比較すると、設定貫入角度 75°、45° は、貫入長比よりも実際の試験時間比の方が小さくなっている。これは、表-2 に示す 1m 貫入するのに要する時間、すなわち貫入速度や貫入角度によるばらつきが影響しているものと考えられる。

因みに、今回 CPTU に加えて実施したラジオアイソトープ貫入試験(RI-CPT)²⁾の試験時間は、CPTU 同様、貫入角度の傾きが大きくなるにつれ長くなる結果となっている。

次に、試験完了後(貫入完了後)に行うコーンプローブ引抜き作業の時間比は、90° (鉛直) を基準とすると、貫入角度 75°、60°、45° の順に 1.44 倍、2.10 倍、2.42 倍となる(表-2 参照)。この結果から、コーンプローブ引抜きに要する時間は、先に示した試験時間同様、貫入角度の傾きが大きくなる、すなわち貫入長の増加に伴い長い時間を必要とするが、試験時間(貫入時間)における貫入長比とは同等でない。これは、90° (鉛直) の引抜き方法が通常のボーリング作業時に使用するトングを用いてほぼ連続的にロッドを引抜くのであるのに対し³⁾、貫入角度 75°、60°、45° 時のロッド引抜き方法は貫入したロッド先端に写真-3 に示す治具を取付け、自走式専用貫入車にてロッドを引抜くためであると考えられる。この治具は、引抜いたロッドの連結部で切離す度に外しては次の引抜きを行うロッドに取付けるという作業を、貫入した最終ロッドを引抜くまで繰返し行わなければならない。つまり、斜め下方貫入後のコーンプローブの引抜き作業は貫入作業と異なり、貫入角度の傾きが大きくなればなるほど作業はより煩雑になり、手間も増えることが分かった。

4. 斜め下方貫入 1m あたりの標準試験単価に対する割増比 (案)

スクリーアンカー等の設置結果、試験の所要時間等を基に、通常の鉛直貫入における 1m あたりの標準試験単価に対して、今回実施した各貫入角度における 1m あたりの割増比を試算した(表-3 参照)。鉛直貫入に対する斜め下方貫入の試算した割増比は、貫入角度 75°、60°、45° の順に 1.15、1.23、1.45 となる。なお、CPTU の鉛直貫入 1m あたりの標準試験単価の算出に当たっては、「全国標準積算資料 土質調査・地質調査(平成 27 年度改正歩掛版)」(以降、同資料と記す)を参考とした。

上記に示す試算した各貫入角度における 1m あたりの割増比と同資料に示されるボーリング調査の傾斜による割増比(90° (鉛直) を基準とした場合、傾斜角度 80° ~60° で 1.1~1.2、60° ~40° で 1.2~1.4、40° ~10° で 1.4~2.0)を比較すると、ほぼ同等の割増比であった。したがって、斜め下方貫入における 1m あたりの CPTU 標準試験単価に対する割増比は、ボーリング調査の傾斜による割増比と同様、貫入角度 60° まだが 1.1~1.2 程度、貫入角度 45° まだが 1.2~1.4 程度でよいのではないかと考える。

5. まとめと今後の課題

試験準備や試験の所要時間、CPTU の斜め下方貫入の標準試験単価に対する割増比(案)等について本実験にて確認できたことは、①斜め下方にスクリーアンカー等を設置するには自走式専用貫入車に設置角度を保持する治具や工夫が必要、②スクリーアンカーの設置角度の傾きが大きくなればなるほど設置時間は多く掛かる、③試験時間(貫入時間)は、貫入長に比例して増加するが、引抜き時間は試験時間のように貫入長に比例するのではなく、貫入角度の傾きが大きくなればなるほど作業はより煩雑になり、手間も増え時間が多く掛かる、④斜め下方貫入の標準試験単価に対する割増比は、ボーリング調査の傾斜による割増比とほぼ同等である。

今後は、今回実験を行った地盤よりも強固な地盤(N 値が比較的高く、多少の礫分を含むような地盤)を対象に斜め下方貫入による実験を実施し、今回確認した事象を改めて検証し、場合によっては修正を行う必要があると考える。加えて、斜め下方貫入がスムーズに行えるような治具の開発や工夫を考案していく所存である。

参考文献

1) 北條豊, 松浦良信ほか:電気式コーン貫入試験の斜め下方貫入への試み(その 1: 実証実験概要), 第 14 回地盤工学会関東支部発表会, pp.416-419, 2017.11 2) 長澤遼, 重富正幸ほか:電気式コーン貫入試験の斜め下方貫入に関する研究(その 5: 斜め下方 RI-CPT 結果の評価), 第 53 回地盤工学研究発表会(投稿中), 2018.7 3) 石井正紀, 高橋千代丸ほか:電気式コーン貫入試験の斜め下方貫入への試み(その 2: 貫入方法や所要時間等について), 第 14 回地盤工学会関東支部発表会, pp.420-422, 2017.11

表-2 CPTU の所要時間等

設定貫入角度(°)		鉛直(90)	75	60	45
CPTU	貫入長(m)	20.85	21.50	24.33	31.61
	鉛直貫入に対する貫入長比	1.00	1.03	1.17	1.52
	鉛直貫入に対する実際の試験時間比	1.00	0.97	1.17	1.28
	1m貫入するために要する時間(分)	1.5	1.4	1.5	1.3
	鉛直引抜きに対する時間比	1.00	1.44	2.10	2.42
RI-CPT	貫入長(m)	20.85	21.50	24.33	31.61
	鉛直貫入に対する貫入長比	1.00	1.03	1.17	1.52
	鉛直貫入に対する実際の試験時間比	1.00	1.02	1.10	1.53
	1m貫入するために要する時間(分)	1.5	1.5	1.5	1.6

注1) 表中の貫入長は、実際に貫入した斜距離を示す。

注2) 表中の1m貫入するために要する時間は、ロッド継足などの作業時間も含む。

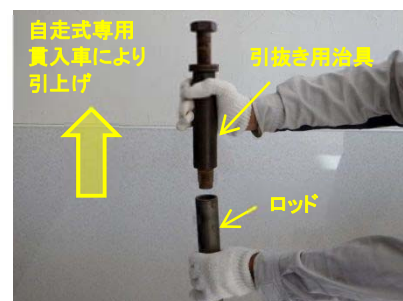


表-3 各設定貫入角度における 1m あたりの CPTU 割増比

貫入角度(°)	90°(鉛直)に対する割増比
90(鉛直)	-
75	1.15
60	1.23
45	1.45

電気式コーン貫入試験の斜め下方貫入に関する研究 (その4：斜め下方 CPTU 結果の評価)

電気式コーン貫入試験
斜め下方貫入
土質分類

(株)地盤試験所	正 会 員	○山本伊作
(株)地盤試験所	正 会 員	岡信太郎
(株)相愛		岸孝司
東邦地下工機(株)	正 会 員	片山浩明
ソイル&ロックエンジニアリング(株)	正 会 員	石井正紀
中央大学	国際会員	齋藤邦夫

1. 概要

本実験では、鉛直 (90°) および斜め下方 (75°, 60°, 45°) の電気式コーン貫入試験 (以降, CPTU と記す) を実施し, CPTU と標準貫入試験 (以降, SPT と記す), および鉛直 CPTU と斜め下方 CPTU の結果を比較検証した。

本稿 (その4) では, CPTU (鉛直) と SPT の試験結果の比較および CPTU の鉛直貫入と斜め下方貫入の結果を対比し, 斜め下方貫入における CPTU の有効性の確認を行った。なお, 本実験の調査概要および斜め下方調査の調査角度結果は参考文献 1), 2) を参照されたい。

2. 鉛直 CPTU と SPT の比較

本実験の地盤調査結果 (鉛直 90°) を図-1 に示す。

SPT の結果から GL-3.90m まで砂質土主体の埋土, その下部に層厚 0.35m の有機質シルト, GL-4.25m~GL-6.00m まで砂質土, GL-6.00m~GL-11.80m まで粘性土となり, GL-11.80m 以深はシルト質細砂で構成されている。しかし, GL-11.80m 以深の砂質土は CPTU の間隙水圧に着目すると, 過剰間隙水圧が発生しており CPTU では粘性土の性状を示している。粒度試験結果を考慮した柱状図では, GL-11.80m 以深は砂質粘土~砂質シルトであった。このことから, 目視による中間土の土層判定は土質試験結果と誤差を生じる可能性があるのに対し, CPTU では土質の性状をより正確に判定できることが明らかである。

GL-4.25m~GL-6.50m の砂質土層では, 補正先端抵抗 $q_t=5.5\sim7.1\text{MPa}$, 周面摩擦 $f_s=56\sim80\text{kPa}$ をピークとし, 概ね高い値を示している。但し, 中間には q_t , f_s の低下と間隙水圧 u の上昇が見られるため, 薄い粘性土が挟在していることが明確に示されている。GL-14.50m~GL-16.50m では q_t の増加と u の低下により, 砂分の割合が増加傾向にあるといえる。CPTU から求める土質分類結果³⁾では, GL-3.90m 以浅の盛土を除き, Q_t - F_r 関係, Q_t - B_q 関係ともに粒度分布を考慮した柱状図と合致する結果が得られた。

3. 鉛直 CPTU と斜め CPTU の粘性土の比較

図-2 に示す深度分布図は, 計測した貫入角度を用いて鉛直深度に補正し, 5cm 毎の区間平均値をプロットしたものである。ただし, 地表面から GL-3.7m までの埋土は, 土質材料や締固め程度の差があるため今回の比較検証より除外した。また, GL-4.25m~GL-6.00m まで砂質土層においても薄層等の理由により除外した。

図-2 の先端抵抗(q_c), 周面摩擦(f_s), 間隙水圧(u)の深度分布では, 45° のデータのみ若干低い値となる傾向が見られるが, いずれの貫入角度もほぼ同等な結果が得られた。

鉛直比の深度分布では GL-4.25m~GL-6.50m の砂質土層を除き, q_c , f_s , u ともに 0.8~1.2 に分布した。測定値同様, 45°/90°のみ 0.1 程度低い傾向がある。GL-6.50m~GL-11.00m の粘性土層では比較的安定した鉛直比で推移しているが, GL-4.25m~GL-6.50m の砂質土層と GL-11.0m 以深の中間土層では鉛直比のばらつきが大きくなる傾向が見られた。特に GL-4.25m~GL-6.50m の砂質土層は, CPTU の土質分類から粘性土と砂質土の互層状であり均一な土層ではない。このことから, 表-1 に示す斜め調査/鉛直調査の統計値では, 砂質土層を除外し粘性土のみで対比を行った。

表-1 に示す三成分データの斜め下方貫入/鉛直貫入の統計値より, 補正先端抵抗, 周面摩擦及び間隙水圧のいずれも非常に良い相関関係にあることが示された。また, 近似式傾きについても q_c , f_s , u いずれも 0.90 を超えており強い相関があるといえる。

補正先端抵抗の平均値は, 鉛直から傾きが大きくなると q_c は僅かに小さくなる傾向が示された。平均値と近似式の傾きはほぼ同じ値となり, 調査角 45°の q_c は調査角 90°の 7%低い測定値であるが, ほぼ同程度であるといえる。

周面摩擦の平均値は 1.00 以上となったが, 近似曲線に着目すると近似曲線の傾きは 1.00 以下となる。調査角 45°の f_s は調査角 90°の平均値より 10%低い測定値となるものの, 総合的にみるとほぼ同程度であるといえる。

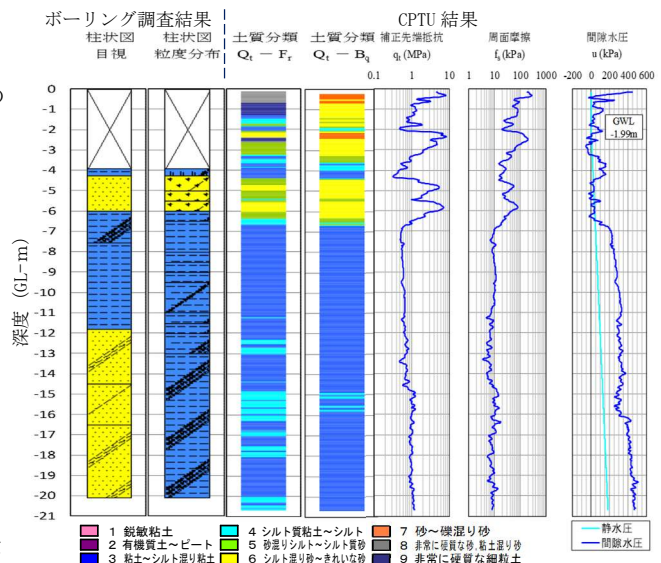


図-1 CPTU と SPT の結果

間隙水圧の平均値は鉛直から傾きが大きくなると u は小さくなる傾向が示されている。調査角 60° は調査角 90° より u は 3~5% 低く測定され、調査角 45° では 6~8% 低い測定値であるが、ほぼ同程度であるといえる。

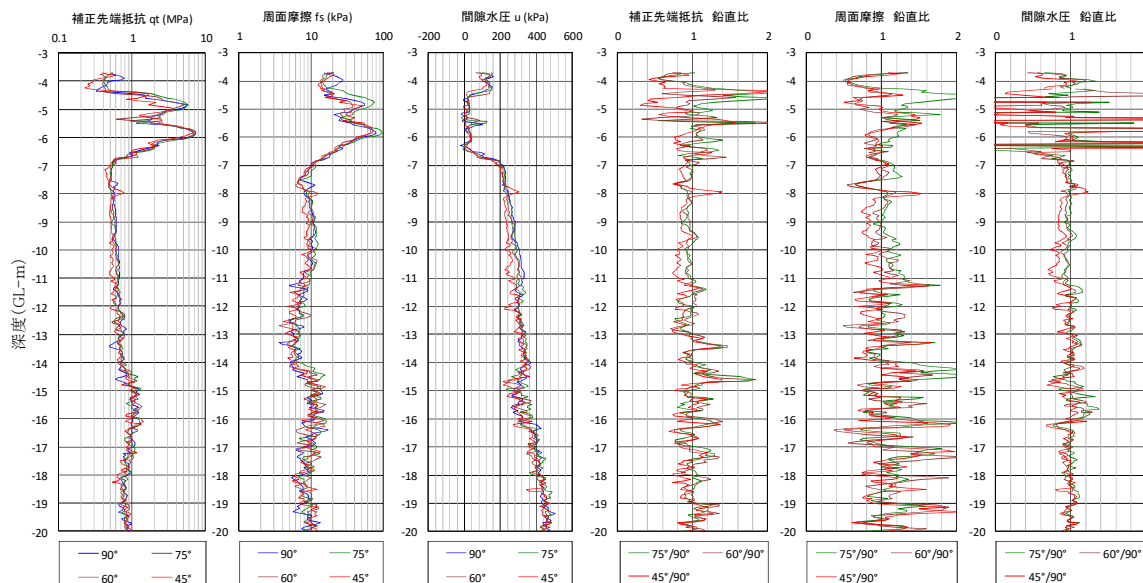


図-2 三成分データと鉛直比

表-1 斜め調査/鉛直調査の統計値

測定データ	調査角度	対象数	平均値	中央値	近似式傾き	標準偏差	変動係数	相関係数
補正先端抵抗	75°	282	1.00	0.97	0.99	0.15	0.15	0.83
	60°	282	1.01	0.98	1.01	0.15	0.15	0.84
	45°	282	0.93	0.89	0.93	0.15	0.17	0.83
周面摩擦	75°	282	1.12	1.09	0.99	0.27	0.24	0.69
	60°	282	1.06	1.03	0.93	0.28	0.26	0.63
	45°	282	1.00	0.93	0.90	0.27	0.27	0.70
間隙水圧	75°	282	1.01	1.00	1.01	0.10	0.10	0.95
	60°	282	0.97	0.96	0.97	0.10	0.10	0.95
	45°	282	0.92	0.94	0.94	0.12	0.13	0.94

4. 鉛直 CPTU と斜め CPTU の土質分類の比較

鉛直 CPTU と斜め CPTU から得られた土質分類を図-3 に示す。

この結果、調査角 90° 、 75° 、 60° 、 45° の土質分類は、 Q_t - F_r 関係、 Q_t - B_q 関係のいずれの土質分類方法によっても同等な結果を得ることができた。

5. まとめ

本実験で得た知見を以下に示す。

- ・ CPTU により中間土の土質をより正確に判定することができる。
- ・ 鉛直 CPTU と斜め CPTU 結果より、補正先端抵抗、周面摩擦及び間隙水圧のいずれにおいても、調査角度が鉛直より傾きが大きくなるに従って僅かに値が小さくなる傾向がみられたが、ほぼ同等な結果を得ることができた。

本実験地盤は、一部に薄い砂質土が存在するが粘性土を主体とする地盤である。したがって、本報告では各貫入角度の比較検討からこの砂質土を除外した。今後は、層厚のある砂質土層を対象とした斜め下方 CPTU を実施し、今回の知見を含めて再検討を行う所存である。なお、本実験では各種室内試験を実施しており、さらに詳細な検討を加えていく予定である。

参考文献：

- 1) 北條豊・松浦良信・脇中康太・糸井理樹・原彰男・岡嶋眞一・片山浩明・西原聡：電気式コーン貫入試験の斜め下方貫入への試み（その 1：実証実験概要），第 14 回地盤工学会関東支部発表会，2017.11.
- 2) 石井正紀・高橋千代丸・若月洋朗・小林優起・武政学・太田雅之・岸孝司・日下部祐基，電気式コーン貫入試験の斜め下方貫入への試み（その 2：貫入方法や所要時間等について），第 14 回地盤工学会関東支部発表会，2017.11.
- 3) 地盤調査の方法と解説（2013）公益財団法人地盤工学会.
- 4) 鈴木康嗣，時松孝次，賓松俊明，コーン貫入試験結果と標準貫入試験から得られた地盤特性との関係，日本建築学会構造系論文集，第 566 号，73-80，2003.

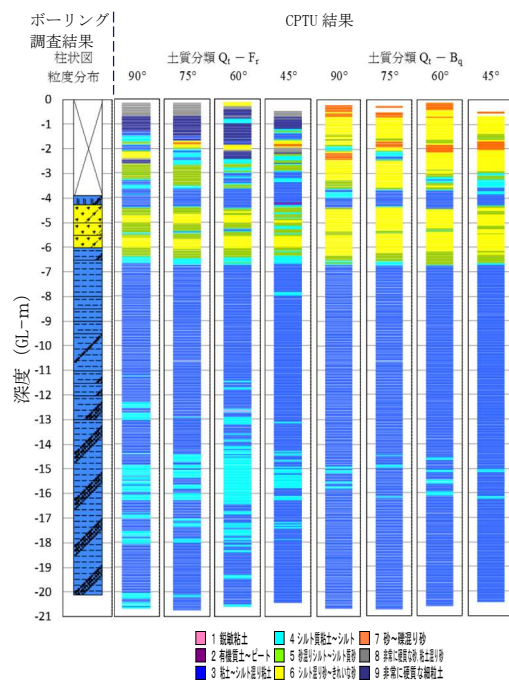


図-3 柱状図と土質分類の対比

電気式コーン貫入試験の斜め下方貫入に関する研究(その 5:斜め下方 RI-CPT 結果の評価)

RI-CPT 斜め下方貫入 湿潤密度

ソイルアントロップエンジニアリング(株)	正 会 員	○長澤 遼
同上	正 会 員	重富正幸
同上	正 会 員	松浦良信
日本物理探査(株)	正 会 員	岡嶋眞一
日揮(株)	国際会員	深沢 健
大和探査技術(株)		糸井理樹

1. はじめに

電気式コーン貫入試験(以降, CPTU と記す)は, ボーリング調査に比べ, 迅速かつ原位置にて力学, 物理特性を把握することができ, 地盤調査, 土構造物およびその下位の地盤などの現状調査において有効な手段である。しかし, 現時点で CPTU は鉛直下方貫入が前提である。斜め下方貫入が可能となれば, その活用範囲は格段に広がるものと考えられる。

本研究は, CPTU の新たな可能性を見出すことを目的とし, 鉛直(90°)貫入が前提である CPTU を斜め下方(75° , 60° , 45°)に貫入し, 斜め下方へ貫入するための方法や所要時間, 鉛直貫入や室内土質試験結果等との比較などを行った。

本稿(その 5)では, CPTU とともに実施したラジオアイソトープコーン貫入試験(以降, RI-CPT と記す)の概要を詳述するとともに, 鉛直貫入と斜め下方貫入における結果(湿潤密度, 含水比)の対比や標準貫入試験より得られた試料や乱れの少ない試料にて実施した室内土質試験結果と対比した結果について報告する。

今回実験を行った地盤の層序は, 近傍でのボーリング調査結果と CPTU 計測結果¹⁾より地表から GL-3.90m まで盛土, その下部に層厚 0.35m の有機質土が存在し, GL-4.25m~GL-6.00m は砂質土層で, GL-6.00m 以深は非常に軟らかい粘性土であった(図-2 に示す柱状図参照)。なお, 試験実施時の地下水位は GL-1.99m であった。地盤の層序を含め実験場所等の実験概要の詳細は, 参考文献 2)を参照されたい。

2. RI-CPT 概要

RI-CPT は, CPTU で計測する先端抵抗 q_c , 周面摩擦 f_s , 間隙水圧 u に加えて, ガンマ線源を利用した後方散乱型 RI 密度計コーンプローブにより湿潤密度 ρ_t , 中性子線源を利用した散乱型 RI 水分計コーンプローブにより含水比 w (含水量)を連続的に計測することが出来る。

後方散乱型 RI 密度計コーンプローブは, ガンマ線源コーンに内蔵したセシウム 137(^{137}Cs)から放出されたガンマ線のうち, 地中を通過して検出部に到達したガンマ線の強度と湿潤密度の関係から, 地盤の湿潤密度の深度分布を計測する。図-1 に示すガンマ線源コーン+密度計プローブで線源由来のガンマ線強度+BG(バックグラウンド: 自然放射線強度)計測を行い, 別途密度計プローブ+BG コーン(ガンマ線源を内蔵していないコーン)で BG を計測し, その差の線源由来のガンマ線強度から湿潤密度を求めるものである。

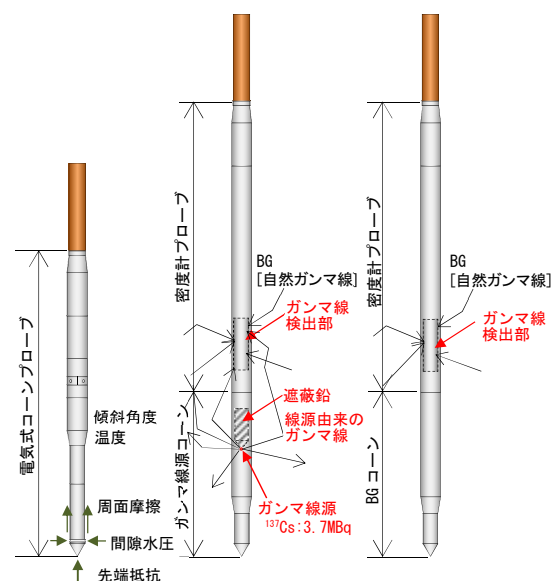


図-1 CPTU および RI-CPT 概略図

本実験においては, 電気式コーンプローブによる CPTU を実施後, 同一孔にてガンマ線源コーン+密度計プローブによるガンマ線密度検層, BG コーン+密度計プローブによる BG 検層を実施した。また, 含水比(含水量)の計測は, 通常カリホルニウム 252(^{252}Cf)の中性子線源を用いた散乱型 RI 水分計コーンプローブにて行う。ただし, 今回は地下水位が比較的高いことから, 後方散乱型 RI 密度計コーンプローブの貫入により得られた湿潤密度に土粒子の密度を設定し, 飽和条件(通常, 飽和度 $S_r=100\%$)から含水比を算出した。

3. 鉛直貫入と斜め下方貫入の比較

図-2 は, RI-CPT で計測した鉛直(90°)貫入および斜め下方貫入(75° , 60° , 45°)の湿潤密度, 含水比の深度分布である。図中の補正深度は, CPTU の貫入時の傾斜角度にて補正した鉛直深度である。この図には, 標準貫入試験により得られた乱した試料の炉乾燥含水比, 別孔にてサンプリングした乱れの少ない試料の湿潤密度, 炉乾燥含水比をプロッ

トしている。ただし、ボーリング柱状図に示す砂質土層の乱れの少ない試料の湿潤密度、含水比は、室内試験より得られた乾燥密度と土粒子の密度を基に算出した飽和密度、飽和含水比である。RI-CPT で計測した湿潤密度から含水比を算出する際に使用した土粒子の密度は、有機質土層を 2.30g/cm^3 、それ以外を 2.65g/cm^3 とした(室内土質試験結果より)。

図-3 は、RI-CPT で計測した鉛直(90°)貫入と斜め下方貫入(75° , 60° , 45°)の湿潤密度と含水比(深度0.5m 毎の平均値)の比較図である。

図-2, 3 より、湿潤密度、含水比とも地表から GL-3.90m までの盛土層と GL-3.90m~GL-4.25m の有機質土層で貫入角度による差異が窺えるが、これは、貫入角度の影響ではなく、試験位置(貫入箇所)の土質材料などの差異が原因と考える。GL-4.25m 以深は、貫入角度に関係なく良く一致しており、貫入角度による計測値への影響はほとんどないものとする。

4. 室内土質試験結果との比較

図-4 上段は、図-2 に示すボーリング柱状図のうち、GL-4.25m 以深の砂質土層と粘性土~シルト層より採取した乱れの少ない試料の(飽和)密度と RI-CPT で計測した各貫入角度の湿潤密度の比較図である。図-4 下段は、乱れの少ない試料および乱れた試料の(飽和)含水比と RI-CPT で計測した各貫入角度の含水比の比較図である。

密度については、貫入角度および土質に関係なくほぼ $\pm 0.05\text{g/cm}^3$ の範囲内に分布している。即ち、RI-CPT で計測した湿潤密度は貫入角度、土質に関わらず、乱れの少ない試料の(飽和)密度と同等であると言える。含水比についても、乱れた試料の有機質土層と砂質土層に相当する結果に差異が見られることを除けば、貫入角度の違いによる差異は見られなかった。有機質土層の差異は、試験位置と試料採取位置の性状の差異によるものとする。砂質土層については、先に示すように乱れた試料の含水比が RI-CPT により計測した含水比より約 10%低くなっているものの、乱れの少ない試料の含水比とは非常に良く一致している。このことから乱れた試料の採取を行うための標準貫入試験では、SPT サンプラーを動的貫入した際の試料圧縮による脱水や、SPT サンプラーを地上に引き上げる際のサンプラー内の試料からの逸水があり³⁾、これが原因となり乱れた試料の両試験(RI-CPT、室内試験)から得られる含水比に差異が生じているものとする。

5. まとめと今後の課題

斜め下方貫入による RI-CPT 計測結果は、地点間の土層性状の差異を除けば、鉛直貫入による RI-CPT 計測結果と差異がないことが確認できた。また、盛土層、有機質土層を除く乱れの少ない試料の室内土質試験結果と非常によく一致していることが確認できた。今回実験を実施した地盤は、軟弱な粘性土層が大半を占め、SPT サンプラーを地上に引き上げる際に含水比が低下し易い砂質土層が薄層であった。今後は、今回実験を行った地盤よりも強固な地盤(N 値が比較的高く、多少の礫分を含むような地盤)や砂質土層が主体の地盤を対象に斜め下方貫入による試験を実施し、今回確認した事象を改めて検証していく必要がある。

参考文献

- 1) 山本伊作, 岡信太郎ほか:電気式コーン貫入試験の斜め下方貫入に関する研究(その 4:斜め下方 CPT 結果の評価), 第 53 回地盤工学研究発表会(投稿中), 2018.7
- 2) 北條豊, 松浦良信ほか:電気式コーン貫入試験の斜め下方貫入への試み(その 1: 実証実験概要), 第 14 回地盤工学会関東支部発表会, pp.416-419, 2017.11
- 3) 越山賢一:砂質土の標準貫入試験試料の含水比に対する検討, 全地連「技術 e-フォーラム 2006」名古屋, 論文 No.76, 2006.

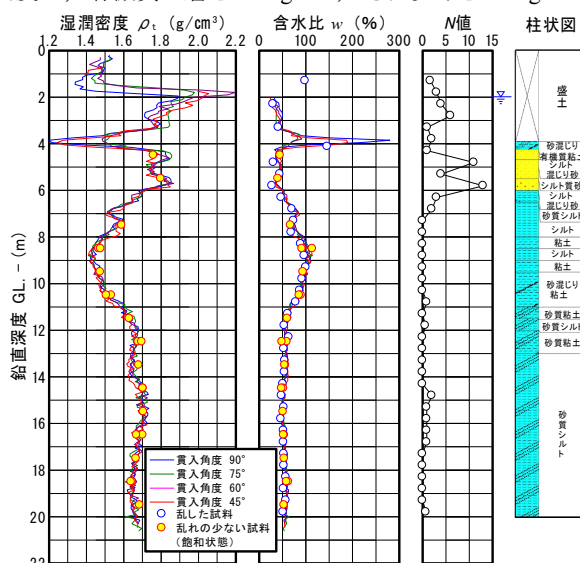


図-2 RI-CPT 計測結果とボーリング調査結果

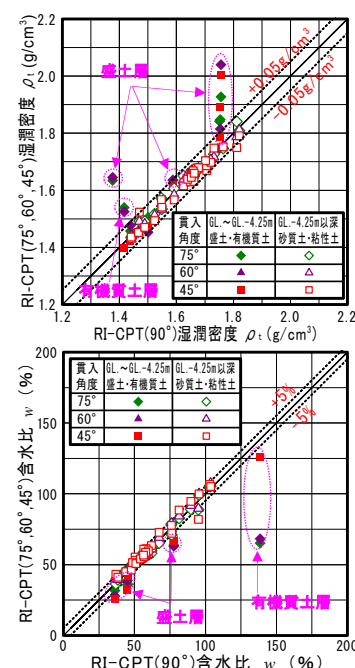


図-3 鉛直貫入と斜め下方貫入との比較

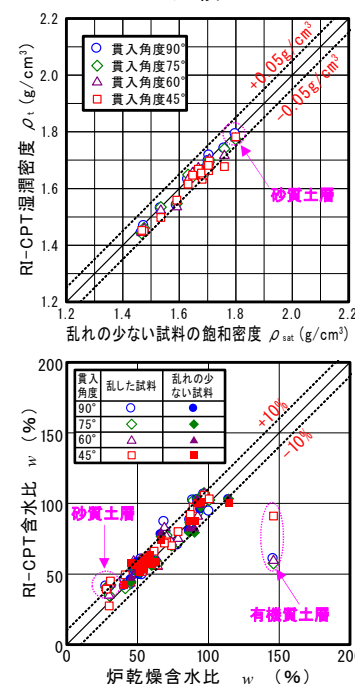


図-4 RI-CPT と室内土質試験結果との比較

電気式コーン貫入試験の斜め下方貫入に関する研究 (その 6 : N 値と物理試験結果の評価)

電気式コーン貫入試験
斜め下方貫入
N 値

(株)地盤試験所 正会員 ○北條 豊 岡 信太朗
(株)サノ大成基礎エンジニアリング 正会員 大森 将樹
北海道土質試験協同組合 正会員 中川 範彦
(株)地球科学総合研究所 正会員 原 彰男
ソイルアンドロックエンジニアリング(株) 正会員 重富 正幸
日揮(株) 国際会員 深沢 健

1. 概要

本研究では、鉛直 (90°) および斜め下方 (75°, 60°, 45°) の電気式コーン貫入試験 (以降, CPTU と記す) を実施し、標準貫入試験 (以降, SPT と記す) および室内土質試験結果と比較検討して斜め下方 CPTU の測定精度と解釈の検討を行った。本論では、SPT から得た N 値と粒度試験結果について報告する。

2. N 値

CPTU から求める換算 N 値 (以降, N_c と記す) は、鈴木ら¹⁾が提唱する (式 1) を採用した。

$$N_c = 0.341 I_c^{1.94} (q_t - 0.2)^{(1.34 - 0.0927 I_c)} \quad (\text{式 1})$$

$$I_c = [(3.47 - \log Q_t)^2 + (\log F_r + 1.22)^2]^{0.5} \quad (\text{式 2})$$

ここで, q_t =補正先端抵抗 (MPa), I_c =土質性状指数

Q_t =規準化先端抵抗, F_r =規準化周面摩擦比

SPT と同深度 (0.5m 間隔, 0.3m 区間) で平均した N_c および N 値を図-1 に示す。GL-3.9m までの盛土は、土質材料、締固め状態にバラツキがあるため、盛土以深の各層で平均した N 値 ($N=0$ 除外) と N_c を図-2, 調査角度毎に求めた N_c の鉛直比を図-3 に示す。

GL-4.25m~GL-6.5m の砂質土層 (S) では、90°の N_c は N 値より 2 程度低い結果となった。また、 N_c の鉛直比は、75°, 60°, 45°で 1.1, 0.9, 0.8 となり、調査角度が傾くと N_c は低くなる傾向を示した。この現象は、鉛直方向の有効土被り圧 σ'_v と水平方向の静止土圧 $K_0\sigma'_v$ の異なる応力状態が関与していることが予想される。従って、斜め下方貫入 CPTU により砂質土の異方性を捉えられる可能性がある。この砂質土層は中央にシルトを挟み、互層状であることから、十分な層厚を持つ砂質土からデータは得られていない。今後、十分な層厚を持つ砂地盤で斜め下方 CPTU を実施し、砂質土の異方性を改めて検証していく必要がある。

GL-6.5m 以深の粘性土層 (MC, M-C, MS) では、 $N=0$ となる区間で $N_c=1\sim2$ となるが、各調査角度の N_c は 0.1 以下の差であった。 $N=0$ 程度の軟弱粘性土に対する (式 1) の適用性に疑問が残るものの、調査角度の違いによる差は無かった。

3. 細粒分含有率

鈴木ら¹⁾が提唱する式 3 の細粒分含有率 (推定 F_c) 結果を図-4 に示す。この結果、各調査角度の粘性土は推定 $F_c > 100\%$ となった。90°の土質性状指数 I_c と粒度試験の細粒分含有率 (F_c) の関係を図-5 に示す。式 3 の推定式では F_c を過大評価してしまうため、プロットの分布性状からワイブル分布曲線を採用して式 4 の修正式を得た。

$$F_c = I_c^{4.2} \quad (\text{式 3}) \quad F'_c = 26.4 [\ln\{1 - (I_c - 1)/2.24\}] \quad (\text{式 4})$$

修正式から求めた細粒分含有率 (修正 F'_c) を図-7, 調査角度毎に修正 F'_c の鉛直比を図-6 に示す。修正 F'_c の鉛直比は、75°, 60°, 45°で 1.07, 0.98, 1.11 となり、調査角度との相関は見られないが、45°の鉛直比は比較的大きくなった。規準化先端抵抗 Q_t の低下と規準化周面摩擦比 F_r の増加により I_c と F_c は増加するが、これは既存の報告²⁾にある通り、45°調査は 90°調査より q_t と f_s が低下していることに起因している。細粒分含有率の解析では、ワイブル分布曲線を修正式として採用したが、今後もデータの蓄積により適切な修正式を検討していく。

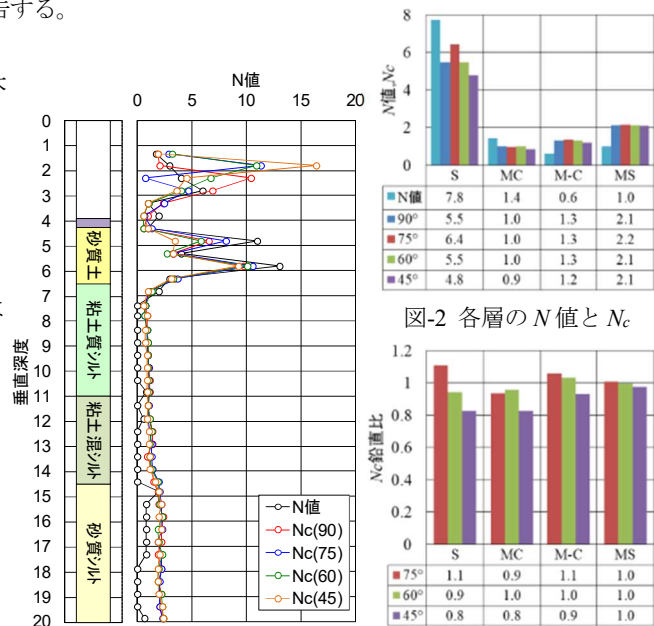


図-1 実験地盤の土層と N 値

図-3 N_c の鉛直比

4. 粒度分布

Tumay ら³⁾は先端抵抗 q_t と周面摩擦比 R_f (f_s/q_t) から、等価換算値 x, y (式 5, 6) を介して土質性状インデックス(U) (式 7) を求め、3つの土質(粘土, シルト, 砂)の構成比(式 8, 9, 10)を推定する Fuzzy 手法を提案している。各構成比 $\mu(U)$ の合計が1となるよう、各土層の構成比を比例計算で補正する。

$$x = 0.1539R_f + 0.8870\log(q_t) - 3.35 \quad (\text{式 5})$$

$$y = -0.2957R_f + 0.4617\log(q_t) - 0.37 \quad (\text{式 6})$$

$$U = \frac{(a_1x - a_2y + b_1)(c_1x - c_2y + d_1)}{(c_1x - c_2y + d_1)^2 + (c_2x + c_1y + d_2)^2} - \frac{(a_2x + a_1y + b_2)(c_2x + c_1y + d_2)}{(c_1x - c_2y + d_1)^2 + (c_2x + c_1y + d_2)^2} \quad (\text{式 7})$$

$$a_1=11.345, a_2=3.795, b_1=15.202, b_2=5.085, c_1=0.296, c_2=0.759, d_1=2.960, d_2=2.477.$$

$$\text{粘土構成比} : \mu_c(U) = \begin{cases} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{U+0.1775}{0.86332}\right)^2\right) & [U \geq -0.1775] \\ 1 & [U < -0.1775] \end{cases} \quad (\text{式 8})$$

$$\text{シルト構成比} : \mu_m(U) = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{U-1.35}{0.724307}\right)^2\right) \quad [-\infty < U < \infty] \quad (\text{式 9})$$

$$\text{砂構成比} : \mu_s(U) = \begin{cases} 1 & [U > 2.6575] \\ \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{U-2.6575}{0.834586}\right)^2\right) & [U \leq 2.6575] \end{cases} \quad (\text{式 10})$$

粒度試験結果と CPTU から求めた Fuzzy 手法の土質構成を図-8, 図-9 に示す。図-8 の深度分布では、砂, シルト, 粘土の構成は粒度試験結果とある程度傾向を捉えている。図-9 の土質毎の対比から、Fuzzy 手法は粒度試験結果と比べて砂は低く、粘土は高く、シルトはほぼ同等な結果が得られ、軽微な修正で精度は向上するものと予想される。現在、CPTU から得られる粒度分布の土質定数は細粒分含有率 F_c のみであり、粘土分含有率やシルト分含有率が把握できることは非常に有益である。今後もデータの蓄積により、Fuzzy 手法の有効性を確認していく所存である。

5. まとめ

本研究では、以下の知見が得られた。

- ・砂質土の N_c の 90° 比は、 75° , 60° , 45° で 1.1, 0.9, 0.8 となり、調査角度が傾くと N_c も低下した。これは、鉛直方向と水平方向の異方な応力状態が関与していることが予想される。本研究では十分な層厚のある砂層からデータを得られていないことから、今後、砂地盤で斜め下方 CPTU を実施し、砂質土の異方性の検証を改めて実施する。
- ・GL-6.5m 以深の粘性土層は、 $N=0$ となる区間で $N=1\sim 2$ となるが、各調査角度の N_c は 0.1 以下の差であった。軟弱粘性土に対する(式 1)の適用性に疑問が残るものの、調査角度の違いによる差は無かった。
- ・鈴木らの F_c 推定式は、粘性土層の推定 F_c は 100% 以上となるため、実測 F_c と I_c の関係からワイブル分布曲線の修正式を作成した。修正式から求めた修正 F_c' の鉛直比は 75° , 60° , 45° で 1.07, 0.98, 1.11 となり、 45° のみ q_t と f_s の測定値が低下する影響を受ける結果であった。
- ・Fuzzy 手法による粒度分布の推定は、粘土分やシルト分の含有率を推定できる有効な手法である。

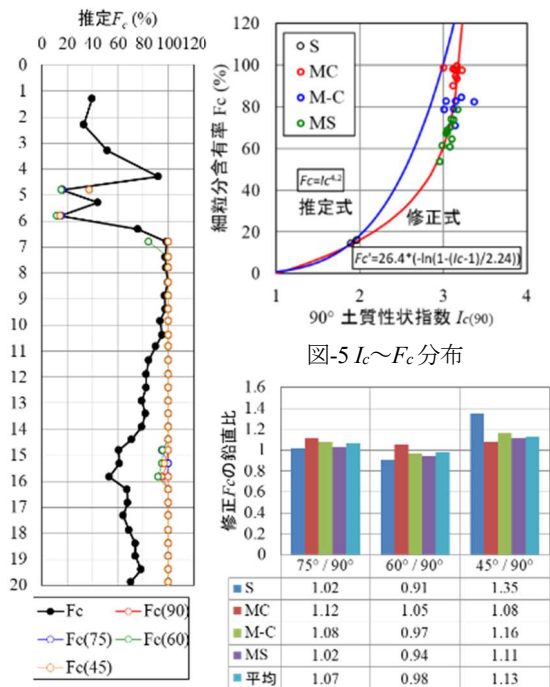


図-4 推定 F_c 分布

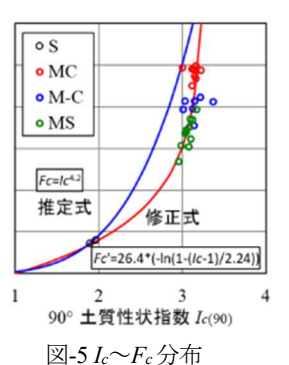


図-6 修正 F_c の鉛直比

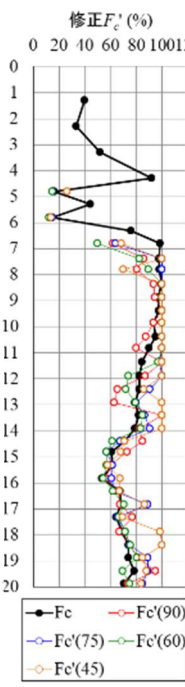


図-7 修正 F_c' 分布

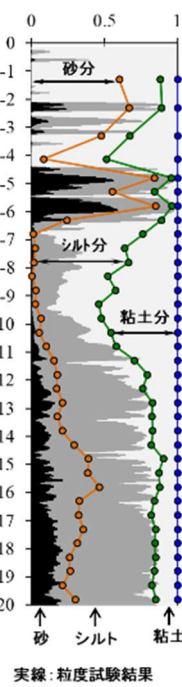


図-8 Fuzzy 手法

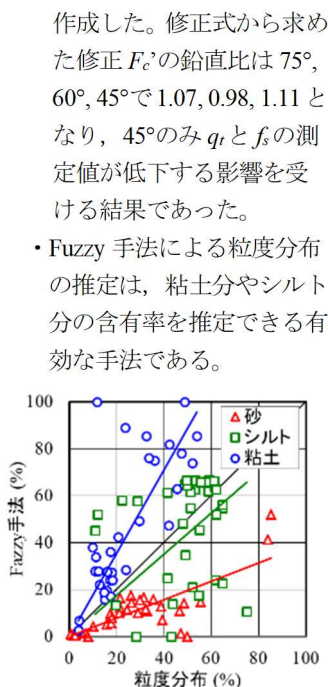


図-9 粒度分布と Fuzzy 手法

参考文献

- 1) 鈴木康嗣, 時松孝次, 實松俊明, コーン貫入試験結果と標準貫入試験から得られた地盤特性との関係, 日本建築学会構造系論文集, 第 566 号, 73-80, 2003.
- 2) 山本伊作, 他, 電気式コーン貫入試験の斜め下方貫入への試み (その 3: 電気式コーン貫入試験結果の評価), 第 14 回地盤工学会関東支部発表会, 2017.
- 3) Tumay, M.T., Abufarsakh, M.Y., Zhang, Z., From Theory to Implementation of a CPT-Based Probabilistic and Fuzzy Soil Classification. ASCE GSP

電気式コーン貫入試験の斜め下方貫入に関する研究（その7：一軸圧縮試験の異方性評価）

電気式コーン貫入試験 斜め下方貫入 一軸圧縮試験

興亜開発

興亜開発

川崎地質

ダイエーコンサルタンツ

中央大学

日揮

正会員 ○鳥越 崇

正会員 橘 久生

正会員 小林 優起

非会員 久下 信明

国際会員 齋藤 邦夫

国際会員 深沢 健

1.はじめに

本研究は、電気式コーン貫入試験（以降、CPTUと記す）の新たな可能性を見出すことを目的とし、鉛直（90°）貫入が前提であるCPTUを斜め下方（75°，60°，45°）に貫入し、斜め下方へ貫入するための方法や所要時間、鉛直貫入や室内土質試験結果等との比較などを行った。

本稿（その7）では、一軸圧縮試験の供試体サイズ（ $\phi 15\text{mm} \times h 35\text{mm}$ ， $\phi 35\text{mm} \times h 80\text{mm}$ ）の影響について比較検証を行ったのち、CPTUと同角度（90°，75°，60°，45°）の一軸圧縮試験結果を比較し、斜めCPTUを用いた鉛直方向のせん断強度を検討した結果を報告する。

2.試験結果

図-1に断面図(概念図)、図-2に粒度分布を示す。

GL-11m以浅は均質なシルトで、GL-11～12mを境に、それ以深は砂分や小貝片が多く含有する砂質シルトであった。

図-3に一軸圧縮試験供試体の採取位置を示す。

図-4に通常供試体($\phi 35\text{mm} \times h 80\text{mm}$)と小型供試体($\phi 15\text{mm} \times h 35\text{mm}$)の一軸圧縮強さの比較結果を示す。一軸圧縮強さは、若干小型供試体のほうが大きいものの、ほぼ1:1程度の対応が認められ、小型供試体も通常供試体と同程度のせん断強さが得られていることがわかる。

一軸圧縮強さの異方性について検討をした結果を図-5に示す。強度比は90°小型供試体の平均一軸圧縮強さに対する角度を変えた供試体の強度の比とした。

鉛直に対しての傾きが大きくなるほどせん断強度は低下する傾向が認められる。すなわち、堆積面方向に近いほどせん断強度が低下していることがわかる。その低下度合いは、90°に対して75°ではおおむね1であるが、60°では平均0.96に、45°では平均0.83となっている。

このことは、斜め方向のせん断強度から、割増を行うことで鉛直

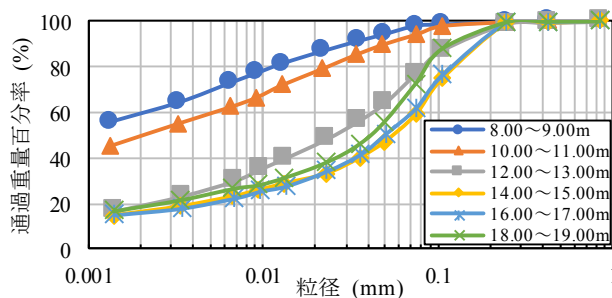
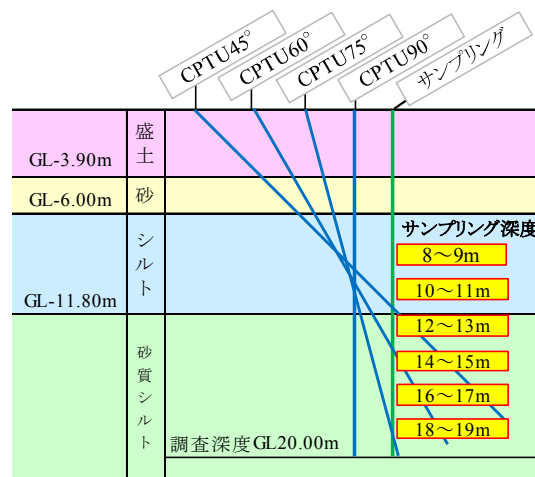


図-2 粒度分布

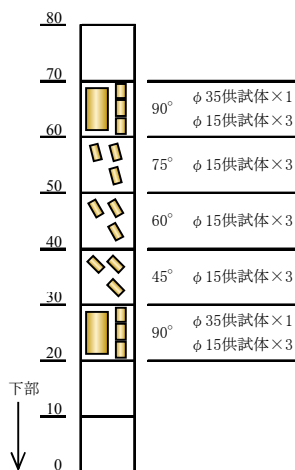


図-3 一軸圧縮試験供試体の採取位置

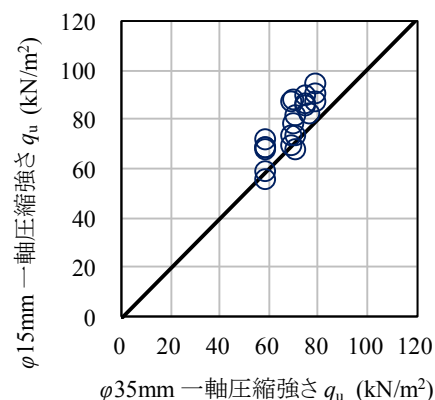


図-4 $\phi 35$ と $\phi 15$ の一軸圧縮強さの比較

Studies on inclined downward penetration of CPT
(Part7: Anisotropic evaluation of uniaxial compression test)

Torigoe Takashi, Koa Kaihatsu Co., Ltd.
Tachibana Hisao, Koa Kaihatsu Co., Ltd.
Kobayashi Yuki, Kawasaki Geological Engineering Co., Ltd.
Kuge Nobuaki, Daiei Consultant Co., Ltd.
Saito Kunio, Chuo University.
Fukasawa Takeshi, JGC Corporation.

方向のせん断強度を推定可能であることを示唆しているといえる。

図-6 に CPTU から求めた一軸圧縮強さと一軸圧縮試験で得られた一軸圧縮強さの深度分布図を示す。CPTU の結果は、実効コーン貫入抵抗 q_n とコーン係数 N_{kt} を用いてせん断強度 c_u を求め、一軸圧縮強さ $q_u=2c_u$ とした。斜め下方貫入 CPTU の結果は、貫入角度による深度補正を行い、 N_{kt} は $N_{kt}=13.5^1$ として作成した。なお、斜め貫入時のデータ評価法は今後の議論を待たなければならないが、今回は従来から行われている鉛直貫入の場合の評価方法を準用した。

各角度とも、比較的均質な GL-15m 程度までは CPTU で推定した一軸圧縮強さと小型供試体による結果がよく一致していることがわかる。

このことは、斜め下方貫入 CPTU による推定せん断強度についても、小型供試体による結果ほど顕著でないものの鉛直からの傾きが大きくなるにつれ、推定せん断強度が小さくなる傾向を示すものといえる。

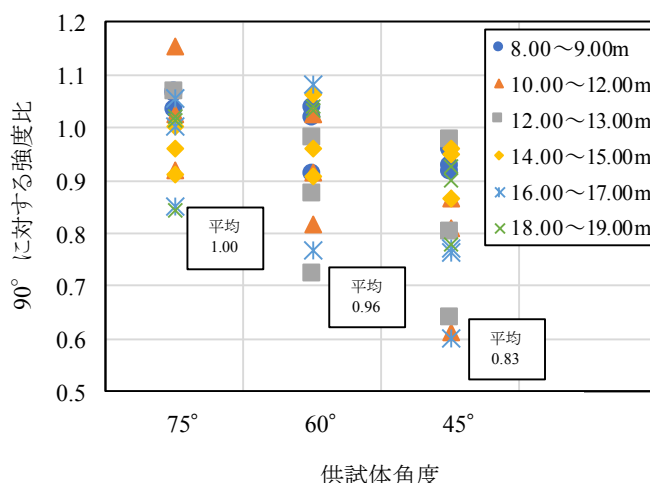


図-5 供試体角度と 90°に対する強度比

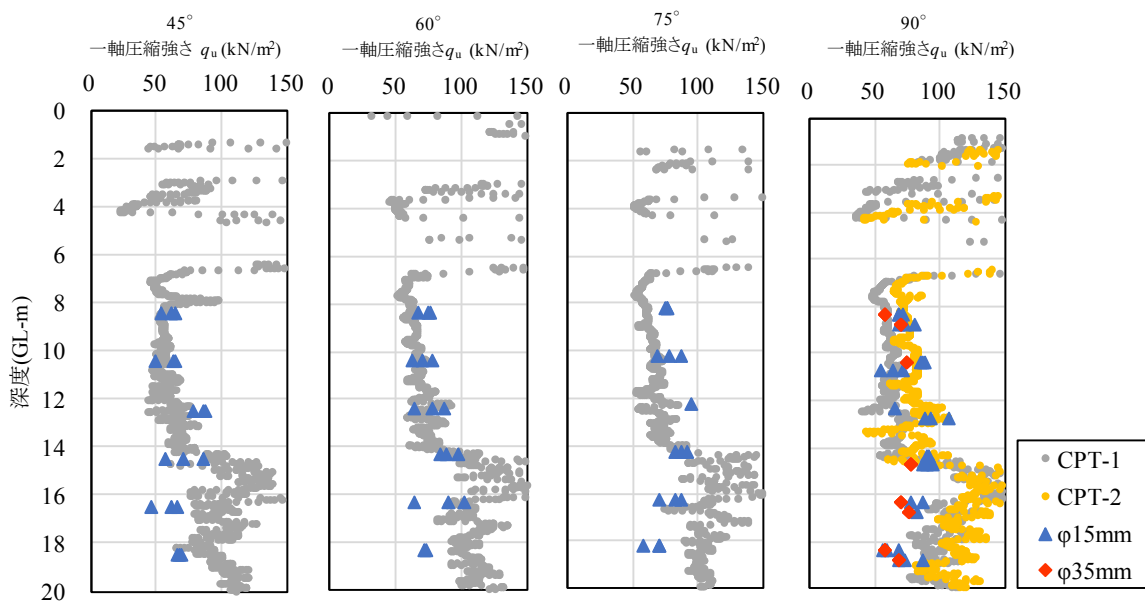


図-6 CPTU から求めた一軸圧縮強さと一軸圧縮試験で得られた一軸圧縮強さの深度分布図

3.まとめ

今回の試験結果を整理すると、以下のことがわかった。

- 1) 90°方向における標準供試体と小型供試体の一軸圧縮強さの比較では、試料観察による異常データを除くとおおむね同程度の結果であった。
- 2) せん断方向の違いによる強度異方性の検討では、鉛直に対しての傾きが大きくなるとせん断強度が低下する傾向が明瞭に認められ、堆積面方向に近いほどせん断強度が低下する結果であった。その低下度合いは、90°に対して 75°ではおおむね 1 であるが、60°では平均 0.96 に、45°では平均 0.83 に低下する結果であった。
- 3) CPTU からコーン係数 N_{kt} を $N_{kt}=13.5$ として推定した一軸圧縮強さは、比較的均質な GL-15m 以浅では小型供試体による結果とよく一致し、斜め下方貫入 CPTU による推定せん断強度においても小型供試体による結果ほど顕著でないものの、鉛直からの傾きが大きくなるにつれて小さくなる傾向を示した。

以上から、比較的均質な粘性土では斜め下方貫入 CPTU を用いて良好に斜め方向の一軸圧縮強さを推定でき、割増を行うことで鉛直方向のせん断強度も推定可能ということが示唆された。今後さらなる現場での強度異方性確認を行い、鉛直方向のせん断強度を推定する際の補正係数を検討していきたい。

参考文献

- 1) 深沢健, 日下部治, 粘性土地盤におけるコーン貫入試験の適用性, 土木学会論文集 No.799/III-72, 153-170, 2005.9

電気式コーン貫入試験の斜め下方貫入に関する研究（その8：力学試験結果の評価）

電気式コーン貫入試験 斜め下方貫入 三軸圧縮試験

中央開発(株) 正 会 員 ○栗原朋之
 (株)ダイヤコンサルタント 正 会 員 太田雅之
 千葉エンジニアリング(株) 正 会 員 若月洋朗
 (株)地盤試験所 正 会 員 高橋千代丸
 中央大学 国際会員 斎藤邦夫
 日揮(株) 国際会員 深沢 健

1. 概要

著者らは、電気式コーン貫入試験（以降、CPTU と記す）の既設構造物直下の調査等の新たな可能性を見出すことを目的とし、鉛直貫入が前提である CPTU の斜め下方(75°、60°、45°)貫入の適用範囲や有用性について検証している。

本研究では、実験地で確認された粘性土層を対象に実施した三軸(UU)試験と一面せん断試験（再圧縮法）により得られた非排水せん断強度(以降、UU 試験は C_u 、一面せん断試験は S_u と記す)と、CPTU より求めるコーン係数(N_{kt})について、貫入角度毎に比較検討を行った。また、圧密試験結果による圧密降伏応力 P_c と CPTU より求める圧密コーン係数(k)について貫入角度毎に比較検討を行った結果について報告する。

2. 実験地の地盤状況

実験地の地盤状況及び土質試験内容を表-1 に示す。本研究では、表層盛土、砂質土を除く GL-6.5~20.0m 間の粘土質シルト(MC 層)、粘土混りシルト(M-C 層)、砂質シルト(MS 層)を対象層とした。粘性土層の性状としては、塑性指数 I_p が深度方向に小さくなる(シルト分が多くなる)傾向を示す。また、GL-14.5m 以深では、細粒分含有率 F_c が小さくなり、中間土の様相を呈する。

3. CPTU による推定値と試験結果の比較

CPTU による土質定数の推定値は、下記に示す既存の提案式¹⁾から求めた。

$$C_u = (q_t - \sigma_v) / N_{kt} \quad (\text{式 } 1)$$

$$P_c = k (q_t - \sigma_v) \quad (\text{式 } 2)$$

ここに、 q_t : 補正先端抵抗(kPa)、 σ_v : 全応力(kPa)、

P_c : 圧密降伏応力(kPa)、 N_{kt} : コーン係数、 k : 圧密コーン係数

CPTU による推定値と土質試験値の比較に際しては、土質試験値はサンプリング中心深度とし、CPTU から得られる q_t はサンプリング区間の平均 q_t として比較した。なお、斜め貫入時のデータ評価法については、今後の検討課題としているため、本研究では従来の鉛直貫入の評価法を準用した。

非排水せん断強度(C_u, S_u)及び圧密降伏応力(P_c)の深度分布を図-1 に示す。また、図-1(中央、右)には、概略調査等で用いるコーン係数の一般値($N_{kt}=13.4^2)$ 、 $k=0.33$ より算出した貫入角度毎の C_u 、 P_c を併記した。

図-1(左)は、土質試験結果 C_u 、 S_u と併せて強度増加率 $m=0.34(C_u/\sigma'_v)$ から求めた正規圧密状態の $C_u=0.34\sigma'_v$ を示した。同図の C_u 、 S_u は、深度方向に漸増する傾向が見られる。ただし、GL-12.0m 以深は、シルト分や砂分の混入量が多くなり、サンプリング後の応力解放の影響により C_u が過小に得られた可能性が考えられる。そのため C_u は、実験地盤の圧密状態(過圧密状態)を踏まえ、 $C_u=0.34\sigma'_v$ 以下となる土質試験値を除外して、深度毎に代表値を設定した。一方、 S_u は、有効土被り圧(σ'_v)で再圧縮することで応力解放の影響を解消しているため、信頼性が高いものと考え、土質試験値を深度毎に代表値として設置した(図-1(中央))。

C_u 、 S_u の代表値と鉛直 CPTU による C_u を比較して図-1(中央)に示す。GL-14.5m 以浅の比較的均質な粘性土においては、試験値と推定値で概ね一致することが分かる。一方で、GL-14.5m 以深の中間土では、部分的な砂の混入等により CPTU による C_u のバラツキが大きくなる。特に GL-15.5m 付近の低塑性シルトを呈する深度では、試験値とやや乖離する。この傾向は、図-1(右)に示す圧密降伏応力 P_c と CPTU による P_c の比較でも確認できる。よって、GL-15.5m 付近は、応力解放の影響による強度低下が推察される。なお、その他の深度は、概ね強度を推定できていると示唆される。

鉛直と貫入角度毎の CPTU による C_u を比較して図-2 に示す。同図は、鉛直貫入を横軸、斜め貫入を縦軸として示す。

表-1 室内土質試験結果

土質 (記号)	深度 GL m	試料名	F_c (%)	I_p	力学試験(kPa)		圧密試験 (kPa)	
					三軸 UU	一面 せん断	P_c	C_c
粘土質 シルト (MC)	-7.5	T1	96.5	32.6	34.1		94.3	0.5
	-8.5	T2	98.2	73.2		32.5		
	-9.5	T3	91.2	83.3	37.1		86.2	1.3
	-10.5	T4	94.3	75.3		38.4		
粘土混り シルト (M-C)	-11.5	T5	82.4	33.8	36.0		117.0	0.6
	-12.5	T6	77.1	27.2		50.5		
	-13.5	T7	84.1	23.6	34.7		104.0	0.4
	-14.5	T8	58.9	19.1		66.0		
砂質 シルト (MS)	-15.5	T9	57.8	11.5	48.1		136.6	0.3
	-16.5	T10	61.9	20.1		80.6		
	-17.5	T11	64.9	19.2	53.0		232.0	0.4
	-18.5	T12	72.4	17.7		71.9		
	-19.5	T13	81.5	21.3	58.0		203.6	0.4

※三軸UU試験は、 $\phi=0$ 法として供試体毎の圧縮強さの1/2から平均値を求めて設定。

※一面せん断試験は、圧密応力=有効土被り圧 σ'_v とした試料のせん断強度を設定。

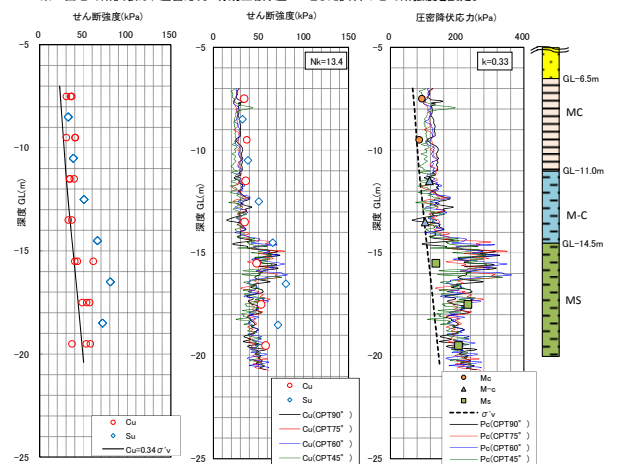


図-1 土質試験結果と CPTU 推定値の深度分布

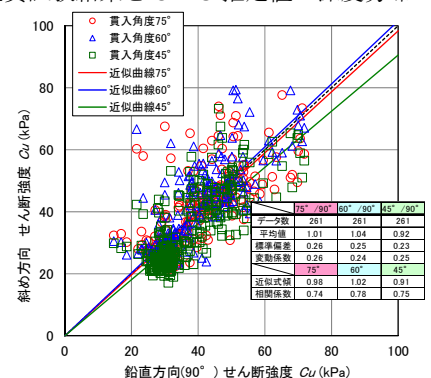


図-2 貫入角度と C_u の関係

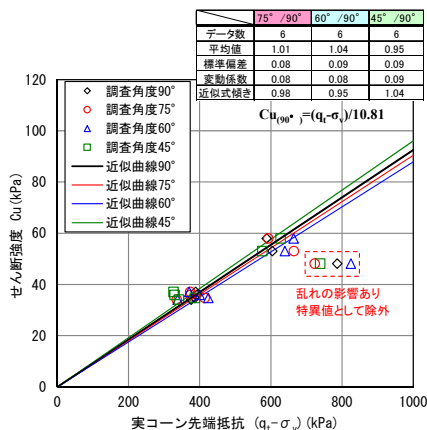


図-3 C_u と $q_t - \sigma_v$ の関係

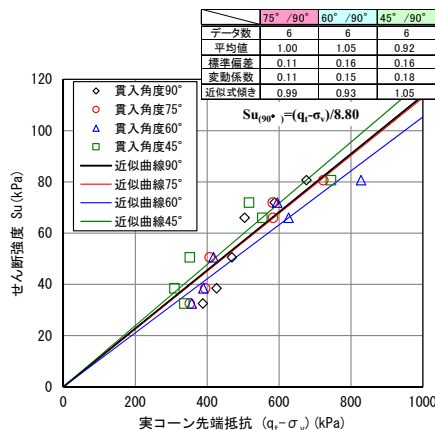


図-4 S_u と $q_t - \sigma_v$ の関係

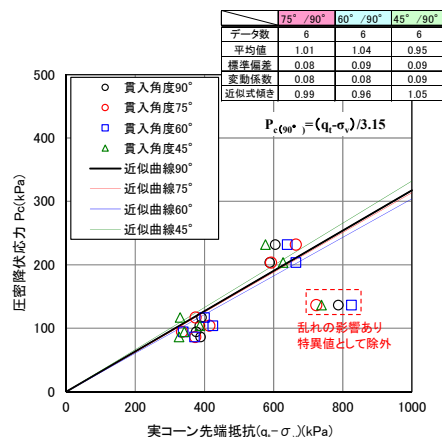


図-5 P_c と $q_t - \sigma_v$ の関係

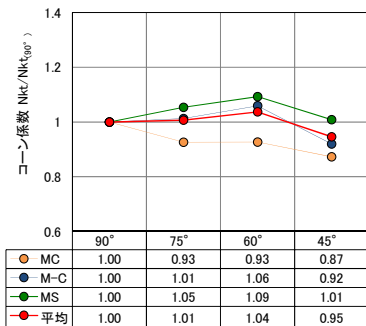


図-6 C_u による N_{kt} の鉛直比

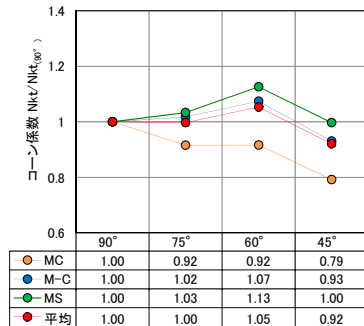


図-7 S_u による N_{kt} の鉛直比

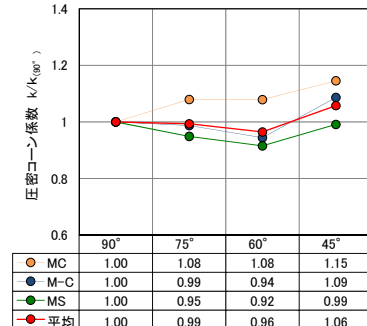


図-8 P_c による k の鉛直比

鉛直貫入に対する貫入角度毎の C_u は、90° に対して貫入角度 75°、60° においてはほぼ同等の推定値となる。一方、貫入角度 45° の場合は、90° に対して 8~9% 程度小さい値となる。

4. 土質試験結果と CPTU 結果の相関

土質試験値 C_u 、 S_u 、 P_c と貫入角度毎の実コーン先端抵抗 ($q_{net} = q_t - \sigma_v$) の関係を図-3~図-5 に示す。

深沢、日下部らによる既往研究²⁾では、国内外 26 箇所の粘性土地盤における $q_u/2$ 、 S_u と q_{net} の関係や σ'_p と q_{net} の関係について、 $q_u/2 = q_{net}/13.4$ ($N_{kt} = 7.6 \sim 19.2$)、 $S_u = q_{net}/11.52$ ($N_{kt} = 6.7 \sim 16.4$)、 $P_c = q_{net}/3.44$ ($N_{kt} = 1.9 \sim 5.0$) となることが報告されている。

本研究の鉛直 CPTU と土質試験結果は、強度特性で $C_u = q_{net}/10.81$ 、 $S_u = q_{net}/8.80$ 、圧密特性で $P_c = q_{net}/3.15$ が得られた。今回と既往研究²⁾で示したコーン係数の結果は、強度特性は提案値の範囲内の数値となり、圧密特性はほぼ同等の結果を得た。土質試験結果による C_u 、 S_u 、 P_c と CPTU による q_{net} の貫入角度毎の鉛直比(斜め/鉛直)は、75°、60°、45° のそれぞれにおいて、平均値で 1.00~1.01、1.04~1.05、0.92~0.95 となる(図-3~図-5 の上表参照)。各種土質試験値と貫入角度毎の q_{net} の関係には、同様の傾向が見られ、貫入角度 75° の場合に 90° と良く一致した。また、貫入角度 45° では、 q_{net} が 5~8% 程度、90° に対して小さい値が得られており、山本らの既往の報告³⁾による q_t の低下傾向と一致する。

5. 鉛直 CPTU と斜め CPTU によるコーン係数の関係

ここでは、土質試験結果 C_u 、 S_u 、 P_c と CPTU より得られる q_t から N_{kt} を算出し、貫入角度毎の N_{kt} を比較した。各種の土質試験値より求めた貫入角度毎のコーン係数 (N_{kt} 、 k) の鉛直比について、角度の違いによる分布を図-6~図-8 に示す。図に示すコーン係数は、土層毎のコーン係数の平均値を鉛直比(斜め/鉛直)として示した値である。

土質試験結果 C_u 、 S_u より求めたコーン係数 N_{kt} は、90° に対して傾きを大きくすると、各層の N_{kt} のバラツキが大きくなる傾向を示す。貫入角度 45° の場合は、75°、60° に対して各層の N_{kt} が低下する傾向を示す(図-6、図-7 参照)。

また、 P_c より求めた圧密コーン係数 k は、90° に対して傾きを大きくすると、各層の k のバラツキが大きくなる傾向を示す。貫入角度 45° の場合は、 k が増加する傾向を示す。各種試験によるコーン係数の貫入角度による変化は、前述した q_{net} の低下に起因する結果である。コーン係数の全層平均は、貫入角度 75° の場合に、90° と良く一致しており、貫入角度 60°、45° と、90° に対して傾きが大きくなるにつれて、差異も大きくなる。

6. まとめ

鉛直 CPTU と斜め CPTU の比較により、以下の知見を得た。

- ・実コーン先端抵抗と土質試験結果の関係より、各種土質試験において既往研究²⁾で提案するコーン係数に近い値を得た。すなわち、コーン係数の一般値から大まかな土質定数の推定が可能であり、従来報告されている CPTU の有用性を確認した。ただし、貫入角度 45° の場合は、推定強度が 90° に対して 8~9% 小さい結果となった。
- ・土質試験結果 C_u 、 S_u による鉛直と斜め CPTU のコーン係数の比は、各種土質試験に係らず、貫入角度 75°、60°、45° のそれぞれで、平均 1.00~1.01、1.04~1.05、0.92~0.95 となり、 P_c による圧密コーン係数の比は、平均 0.99、0.96、1.06 となった。以上の結果より、貫入角度が 75° の場合においては、ほぼ 90° と同等の値を得られることが分かった。また、貫入角度 45° の場合は、既往の報告³⁾において q_t の低下が報告されており、本研究においても q_t に起因する推定強度の低下が認められたことから、適用に当たっては、今後、補正方法等の検討が必要と考える。

【参考文献】

- 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
- 深沢健，日下部治，粘性土地盤におけるコーン貫入試験の適用性，土木学会論文集 No.799/III-72，153-170，2005.9
- 山本伊作，重富正幸，栗原朋之，久下信明，橘久生，佐渡耕一郎，大塚潤，深沢健，電気式コーン貫入試験の斜め下方への試み（その 3：電気式コーン貫入試験結果の評価），第 14 回地盤工学会関東支部発表会，2017.11