

## 力触覚技術を用いた粘性土判定における研究

株式会社サムシング ○西堀義行  
慶應義塾大学 浅井 洋、大西公平

### 1. はじめに

ボーリング調査による土質判定は、目視及び手触り感により土質観察から人の判断により土質区分を判定している。礫と砂の粒径は目視で判別できるが、シルトと粘土の粒径は細かいため、目視では判別がむずかしい。そのため、シルトと粘土の細区分は、表-1 より粘り気の感触と砂分の混入状態から判別されている。

表-1 シルトの粘土の細区分<sup>1)</sup>

シルト	砂質シルト	粘り気	弱
	シルト		
粘土	粘土質シルト	粘り気	強
	砂質粘土		
	シルト質粘土		
	粘土		

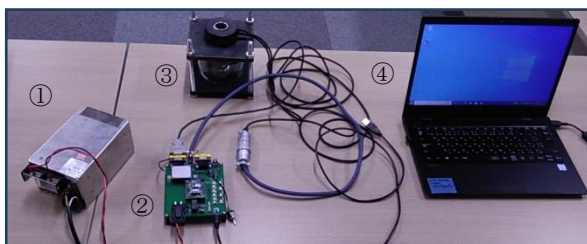
実際のところは正しく判別できているか不透明であり、判定者によるばらつきが生じていた。

今後はさらに超高齢化社会より、高齢者の大量離職が見込まれている。技術者も含めて生産労働人口が減少するため、建設分野の発展・維持には一人当たりの生産性向上を図る必要がある。人とかわる取組みとして、ロボットやAI等を用いて、人の判断を支援する必要性が高まっている。技術継承より、暗黙知をより形式知化にしていくことで、技術の自動化・自律化を実現させ、品質向上を図っていくことが今後一層求められている。

力触覚（以下、リアルハプティクスと称す）技術は、接触対象の感覚を力制御・力計測ができる力触覚伝送技術である。人が手触り感で実施していることを、リアルハプティクス技術を用いて標準化する装置開発を目的とした。リアルハプティクス技術は感触の数値化ができるため、粘り気の状態を計測して土質判定の精度評価について実験的研究を実施した。

### 2. 実験装置の全体回路

③に粘性土サンプルを入れて、開発した実験装置にセットする。①・②・④を配線により接続して計測を実施した。（写真-1）



- ①電源
- ②汎用制御基板にABCコアを装着
- ③土砂攪拌装置（ダイレクトドライブモータを天端に装着）
- ④PC（専用ソフトにてUSBメモリ内のアプリを使用）

写真-1 実験装置一式

### 3. 土砂攪拌装置の構造

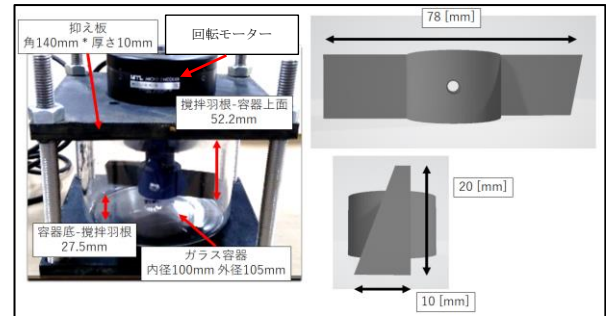


写真-2 土砂攪拌装置と攪拌羽根の寸法

土砂攪拌装置と攪拌羽根の形状・寸法を示す。（写真-2）回転部の攪拌羽根は、接続されたマイクロテック・ラボラトリー社製MDH-7018回転モーター（定格トルク1.0Nm, 定格回転速度200rpm）で制御され、一定速度で回転させた際のトルク値について0.01秒ごとにABCコアで計測する構造となっている。

### 4. 実験用の粘性土サンプルについて

実験で用いた粘性土サンプルは、塑性状（ネバネバ状態）にするため、徐々に加水させて手で練り混ぜを行い、含水を調整した。実験は準備できた粘性土サンプルの47サンプルについて実施した。

### 5. 実験方法

- ① 団子状にした粘性土サンプルを2つ用意し、ガラス容器（直径95mm・高さ78mm）の真ん中を空けた上下部に設置する。団子の大きさは高さを目安とし、攪拌羽根の天端までとする。それ以上大きな団子状は、土の量を減らすか手で変形をさせる。（写真-3左図）
- ② 粘性土サンプルと重ならないように、攪拌羽根と粘性土サンプルが十字になるようにあわせ、4角のボルトを通してガラス容器に被せる。（写真-3右図）



写真-3 粘性土サンプルの設置状態

- ③ 4隅のボルトをナットで止めて固定する。
- ④ PCで専用ソフトを操作し、0.5rps（1秒間に半回転）で回転制御させて計測する。
- ⑤ 1分間以上計測し、回転を停止させる。
- ⑥ 土砂攪拌部をガラス容器天端からはずし、土の状態

を確認する。問題ないきれいに攪拌できた状態が左写真、攪拌羽根に粘り着き離れず供回り現象を発生させた状態が右写真と判定した。右写真の場合はデータは棄却した。(写真-4)



写真-4 攪拌後の土の状態

## 6. データ解析方法

代表的な波形グラフとして、時間とトルク値(左図)、時間と回転速度(右図)のグラフを示す。(図-1)

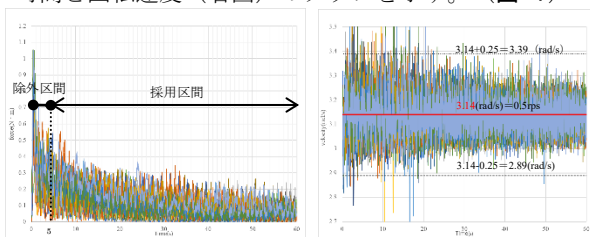


図-1 代表的なグラフ

時間とトルク値の波形グラフは、0~5秒間まではトルク値が大きくなる。0~5秒間は土圧(団子状の粘性土サンプルの重量)の影響が大きいことによる計測値の上昇であるため除外した。5~60秒間は徐々に下降またはほぼ水平に推移しており、土圧はなく触っている感触として5~60秒間区間を採用した。1サンプル25回計測を実施したが、トルク値が異常に上がり続けて収束しない波形グラフや途中から急にトルク値が上がりはじめる波形グラフについても除外した。

回転速度の波形グラフは、3.14(=0.5rps)にあわせて制御されている。正しく計測されたデータは±0.25(2.89~3.39)の範囲に概ね収まっていることがデータ分析よりわかった。これ以上で収まってない場合は、土が攪拌羽根に粘り着き離れず供回り現象とし除外した。そのため、47サンプルの内、2サンプルは除外した。

## 7. 粒度分布との比較の条件

### ①試験データ

- ・1試料で25回・47試料実施。
- ・抽出時間：5~60秒
- ・トルク値・回転速度数：1回5500データ

### ②仮定条件

47波形グラフの比較により、砂分の混在が多くなるとトルク値が小さくなる傾向がある。これより、細粒分含有率( $F_c$ )%は、1回のトルク値の平均値との関係性があると仮定した。

47データより、1回のトルク値の標準偏差( $\sigma$ )は、土質試験の粒度分布と比較すると粘土分が多いと大きくなり、シルト分が多いと小さくなる傾向がある。したがって、礫分と砂分の影響を数値上除外するため、細粒分含

有率( $F_c$ )%から粘土分とシルト分のトルク値の標準偏差( $\sigma_{(M+C)}$ )を均等割で求めることを仮定した。トルク値の標準偏差( $\sigma$ )は不偏分散から求め、95%信頼区間を採用し $2\sigma$ を用いた。

$$\sigma_{(M)} = \sigma_{(M+C)} C / F_c \quad \dots \text{式-1}$$

$$\sigma_{(C)} = \sigma_{(M+C)} M / F_c \quad \dots \text{式-2}$$

ここで、 $\sigma_{(M)}$ ：粘土分のトルク値の標準偏差均等割

$\sigma_{(C)}$ ：シルト分のトルク値の標準偏差均等割

$$\sigma_{(M+C)} : 2\sigma F_c / 100 \quad \dots \text{式-3}$$

$\sigma$ ：トルク値の標準偏差

$C$ ：粘土分の含有率(土の粒度試験より)

$M$ ：シルト分の含有率(土の粒度試験より)

$F_c$ ：細粒分含有率(土の粒度試験より)

## 8. 比較結果

### ①細粒分含有率とトルク値の関係(図-2)

1データにおけるばらつきがあるが、80%~100%までは相関性している。

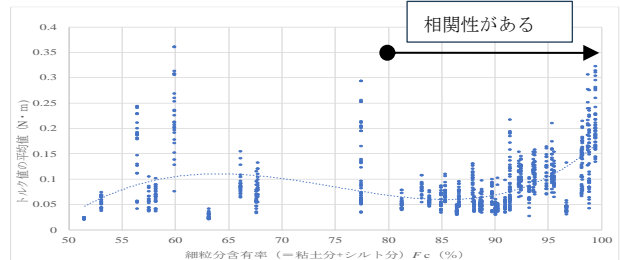


図-2 細粒分含有率とトルク値の平均値の関係

### ②粘土分とシルト分の均等含有率とトルク値の標準偏差均等割による関係(図-3)

粘土分とシルト分ともにばらつきが大きく、相関性はあるかは不明瞭である。ただし、粘土分よりシルト分のばらつきが小さいため、シルト分から求めることより、粘土分を求めることができる可能性があると考えられる。

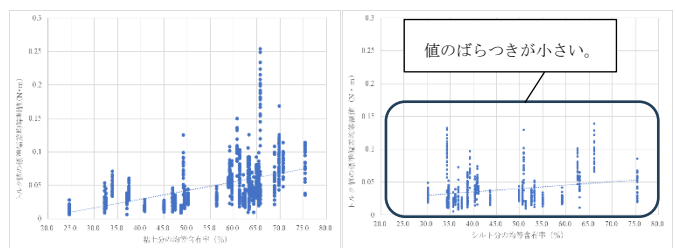


図-3 粘土分(左図)とシルト分(右図)の均等含有率とトルク値の標準偏差均等割の関係

## 9. まとめ

47サンプルの内、採用できたのが45サンプルである。結果としてサンプル数がまだ足りない。しかし、細粒分含有率80~100%の相関性とシルト分の均等含有率のばらつきが小さいことから、リアルハプティクス技術による土砂攪拌装置において粘性土判定の可能性があることが本研究よりわかった。

## 《引用・参考文献》

- 1) ボーリング野帳記入マニュアル【土質編】 第2版(2000)：社団法人全国地質調査業協会連合会：, pp. 42.



## ポータブル貫入試験機のカイゼン

(株) 東設土木コンサルタント ○惣塚 潤一 植田 成二

### 1. はじめに

全地連「技術フォーラム 2017」旭川で、送電鉄塔を対象とした山岳地用軽量N値測定器(ポータブル貫入試験機)の開発を発表した。その際、①硬質部が出現した場合、支持層の層厚をどのように確認するのか、②クローラで運搬できない場合、どのように運搬するのか、という質問を受け今後の課題とした。

今回の発表は、上記課題をカイゼンした結果を発表する。その間に、同手法は、特許第 6619235 号『軽量地盤調査機及びこれを用いた地盤調査方法』を取得した。

### 2. 開発機器のカイゼン

#### (1) 既往機器の試験方法

既往機器は回転削孔機能を有さないため、連続的に標準貫入試験を実施する。このため、サンプラー周囲摩擦力がはたらき、実際より大きなN値となる。この対策として貫入試験毎に先端にテーパ形刃先を付けた専用拡孔バレル(φ56mm-66mm-76mm)により拡孔し、周囲摩擦を除去して掘進する(図-1)。

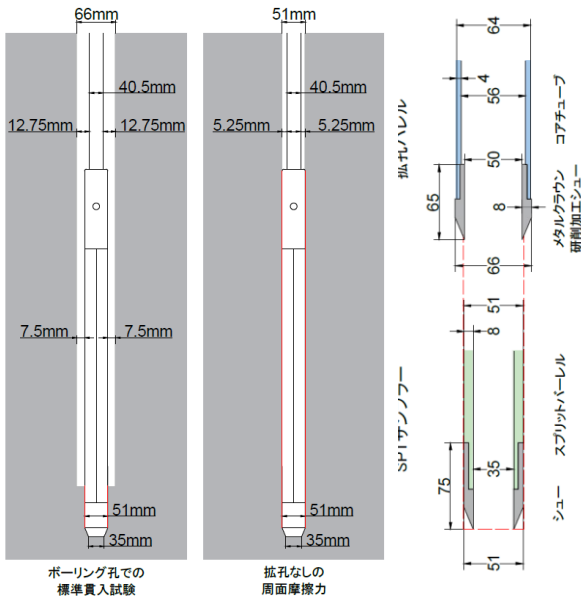


図-1 サンプラーの周囲摩擦と拡孔バレル

#### (2) 支持層の層厚を確認するためのカイゼン

硬質部を削孔するためには、打撃削孔では困難なため、回転削孔機能を有する必要がある。ボーリング削孔ツールの使用を前提にコアカッターの搭載を採用した。コアカッターの動力はモーターであるため、簡易に運べるサイズの発電機が必要となる。検討した結果、必要電力2.7kWを満たすには、1.8kWの小型発電機2台を並列運転(3.6kW相当)して削孔可能となった。また、ケーシング削孔するため、作業高さ1mを確保し、削孔と標準貫入試験を同一鉛直線を実施可能な簡易足場を制作した(写真

1)。同カイゼンにより写真-2に示す地質試料を採取することが可能となった。これにより、従前の打撃削孔から回転削孔と打撃削孔の両者の機能を有することになり、ボーリング調査と同様にN値50以上、層厚5m確認が可能になった。しかし、機能追加により、コアカッター資材、ケーシング類やダブルコアチューブなどの削孔ツール、足場材等の資材が追加となり機材総重量は0.5t(運搬車0.2t含む)から1.3tと増加した。



写真-1 コアカッター搭載型ポータブル貫入試験機全景

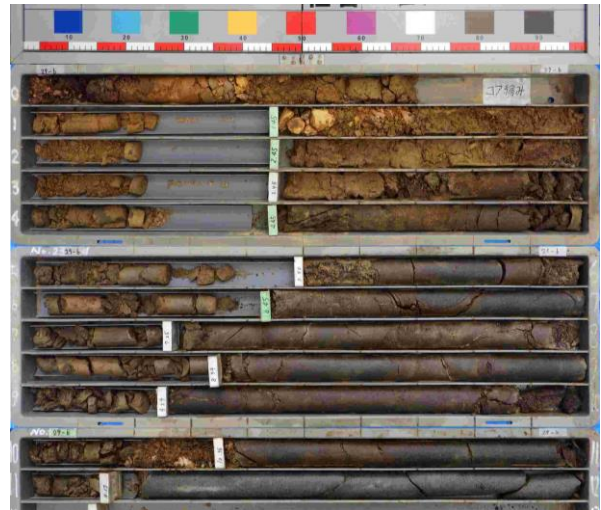


写真-2 地質試料採取状況

#### (3) 運搬方法のカイゼン

##### ①ヘリ運搬

長距離モノレール運搬のコスト低減策としてヘリによる資材運搬を検討した。ボーリング資材2.1tに対してポータブル貫入試験機重量は1.3tである。内訳は、調査機本体0.2t、コアカッター0.2t、仮設材0.2t、削孔ツール0.3t、雑資材0.2t、運搬車0.2tである。最大積載量1tのヘリで2回の運搬で対応できるよう荷造りを運搬車、調査機材、削孔ツールの3梱包にできるよう工夫を行った(写真-3)。また、1日の物輸で複数地点を運搬することで、飛行日数の低減を図り、コスト低減を図った。



写真-3 ヘリ運搬状況

## ②ドローン運搬

長距離モノレール運搬のコストの低減策としてドローンによる資材運搬を検討した。ドローンの最大積載量は50kgであるため、全ての資材を50kg以下に分解できるよう改良を加えた。特に、ポータブル貫入試験機本体は、75kg以上の重量のため、油圧ユニットやプーリーを取り外し可能に改良し、さらに取付ネジの規格も統一し作業の効率化を図った。運搬に際しては、1梱包の重量を測定し最大積載量を超過しないような荷造りルールを確立した。これにより運搬機0.2tを除く1.1tの資材を1日のフライトで運搬が可能となった(写真-4)。また、モノレールやヘリと比較して荷吊り場および荷降ろし場の作業範囲を小さく設定できることから、上記運搬手法より伐採費や補償費、申請作業の低減が可能となった。



写真-4 ドローン運搬状況

## (4)不攪乱試料採取の追加カイゼン

回転削孔機能を有したことにより、力学試験実施に向けた試料採取方法の追加カイゼンが可能となった。コアカッターの回転数は低速で300rpm、高速で700rpmであるため、不攪乱試料を採取するには回転が速く試料を乱す懸念があった。回転数を低減するために、①電圧を制御して回転数を低減する、②減速装置を取付けて回転数を低減する2案を提案・検討した。結果、電圧を制御して回転数を低減した場合、トルクも減衰することが判明し①案は不適とした。減速装置については、ギアの大きさに比例して回転を低減できること、ギアの大きさにより接続機器の小型化が製作可能なことから、②案の減速装置を採用した(図-2)。

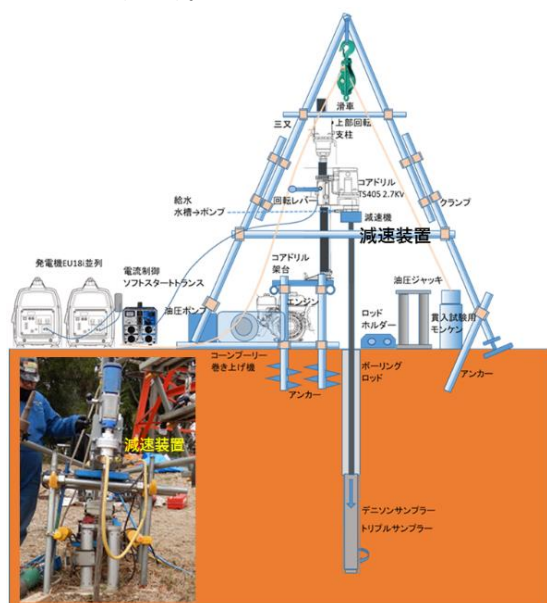


図-2 不攪乱試料採取概念図

減速装置を採用したことにより、コアカッター回転数を300⇒75rpm、トルクを86.3⇒344.2N・mにカイゼンし、ボーリングマシン回転数60~100rpm、トルク470.7N・m性能に近づけることができ、礫混じり土砂を対象とした不攪乱試料採取が可能となった。今後は、礫混じり土砂以外の土質で適用可能であるか試験を行う。

## 3. 開発機による実績と性能

### (1)調査実績

回転機能を有するポータブル貫入試験機は2020年度の導入以降、約4年間で鉄塔調査主体に167孔、削孔長2200mの調査実績を有する。また、運搬に関してはヘリ運搬2現場、ドローン運搬3現場の実績である。

### (2)カイゼンした開発機器の性能

#### ①調査深度

調査深度は、コアチューブおよびケーシングを回転させる能力、すなわち回転トルクによるが、現況では20m程度である。地盤条件により異なるが、最大で25mの実績である。

#### ②N値精度

ボーリングと同様に JIS A 1219 : 2023規格で実施可能である。

#### ③支持層(N値50以上)の確認深度

回転削孔機能を有したことから、支持層(N値50以上)を5m以上確認可能である。

## 4. 運搬のコスト比較・安全性

モノレール運搬費、ヘリ運搬費、ドローン運搬費を比較すると、モノレール仮設長が概ね300mを超える条件で、ヘリ運搬とドローン運搬が安価となる。近年急速に普及しているドローン運搬の安全性については、航空法の準拠、機体の耐久性向上、有視界操縦、操作技術の向上、ヘリと同様の荷造りなど墜落・落下災害防止に留意し、導入以来無災害で運行しており安全性は高い。

## 5. おわりに

開発機器のカイゼンにより、支持層の層厚確認、運搬方法の多様化が可能となった。また、動力をモーター仕様に変更すると閉塞環境化(深礎基礎の底面)で鉄塔基礎の床付け検査も可能となった(写真-5)。



写真-5 鉄塔基礎床付け検査状況

今後は、調査深度のさらなる深度化を図り、送電鉄塔以外の山岳構造物(陸上風力発電基礎および周辺設備など)に対しても適用範囲を拡げ、社会資本整備に貢献したいと考える。

以上



【CO76】

宅地地盤におけるスクリーウエイト貫入試験と地形区分による相関性と評価

新協地水株式会社 ○二瓶 光, 廣居 雅史

1. はじめに

スクリーウエイト貫入試験（以降 SWS 試験）は、地盤の硬軟、締まり具合及び土層構成を判定するための簡易な地盤調査方法であり、戸建住宅等の小規模建築物の基礎地盤情報を把握することを目的として、広く普及している。

地盤情報として、昨今、ボーリング柱状図や井戸掘削のデータベース化が進められているが、SWS 試験による表層の地盤情報は多く蓄積されていながらも、データベースは公開されていない。戸建て住宅等の小規模建築物では非常に浅い深度の地盤情報が重要となっていることから、SWS 試験結果をデータベース化し、各種分布図を作成し、小規模建築物の基礎地盤としての地盤情報を可視化することが必要とされていた。

また、小規模建築物の基礎地盤の調査では資料調査として、微地形区分による評価が行われている。SWS 試験結果と地形区分評価・検証を行い、相関性について示す。

2. 検証方法

今回は以下の方法でデータベースの作成および SWS 試験と微地形分の相関性について検証した。

(1) データベースの構築

収集した SWS 試験データは当社で実施した6222件の SWS 試験結果をデータベースとして整理した。

今回のデータベース化に当たっては、福島県において実施したデータに限定し、調査位置の不明確なものを除外した。この中で、SWS 試験結果データベースとして有効なデータ件数は4827件であった。

データベース化した SWS 試験データから自沈層分布図および試験最終深度分布図を作成し、地盤情報の可視化を行った。

(2) 相関性の検証

データベースを基に地形と SWS 試験結果の相関性について整理する。

地形区分は「山地・丘陵」「台地」「低地」の3つに大区分し、それぞれの地形区分による調査件数、原地形面における SWS 試験荷重 ( $W_{sw}$ ) 0.75kN 以下の自沈層の割合、盛土層における SWS 試験荷重 ( $W_{sw}$ ) 1.0kN 以下の自沈層の割合を抽出し、各地形面における試験結果の傾向を検証した。

また、試験最終深度が支持地盤に相当する地層と見込み、最終深度分布頻度を地形毎に算出した。

3. 結果

(1) データベースについて

地形区分と SWS 試験結果データベースを基にフリー・オープンソース・システムの「QGIS」を用いて、以下の分布図を作成した。

①自沈層分布図

宅地地盤等の小規模建築物では、SWS 試験における荷重 ( $W_{sw}$ ) 0.75kN 以下の自沈層の有無がその後の地盤改良の必要性に係わるため、自沈層に注目し、分布図 (0.75kN 以下) を作成した。

自沈層分布図から、福島県内では地形的な差異は少なく、全体に荷重 ( $W_{sw}$ ) 0.75kN 以下の自沈層が分布するが、県南地方およびいわき市に自沈層が深く分布している。

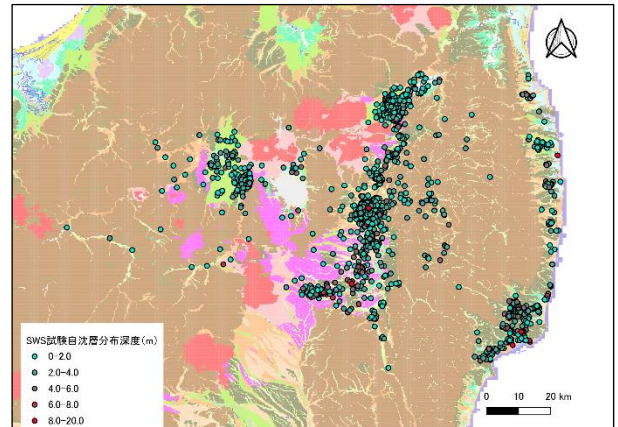


図-1 自沈層分布図(0.75kN 以下)<sup>1)</sup>

②試験最終深度分布図

SWS 試験における最終調査深度分布図を作成することにより、概略的な小規模建築物における支持地盤の分布深度を把握した。

試験最終深度分布図は、福島県郡山市街地周辺を対象に作成し、図の中心から南北方向は一樣に最終深度が深く、東西方向は比較的浅い傾向となっている。

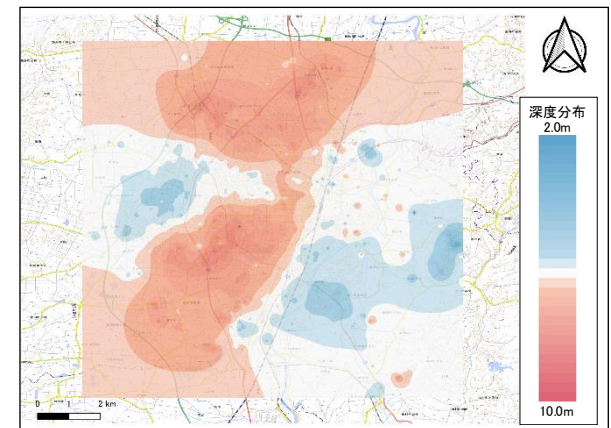


図-2 試験最終深度分布図(郡山市街地周辺)<sup>2)</sup>

(2) 地形区分とSWS 試験結果の相関性について

表-1に地形区分と調査件数について示す。

各地形区分において、原地形面における0.75kN以下の自沈層の分布割合は、「山地・丘陵」で30.1%、「台地」で52.5%、「低地」で48.5%であり、調査件数の45.9%で軟弱な自沈層が分布している。

「台地」および「低地」は、原地形面における自沈層の割合が48.5～52.5%を示し、約50%に自沈層が分布していることから、その特徴を把握するため、微地形に細区分した。

「台地」では、火山灰質台地の自沈層の割合が80.5%であり、突出して多い(表-2)。

「低地」では、原地形面での自沈層の割合に大きな差は無く、40.3～64.5%の範囲である(表-3)。

盛土層の1.0kN以下の自沈層についても、「山地・丘陵」で36.0%、「台地」で8.5%、「低地」で16.4%であり、調査件数の17.9%で盛土層に自沈層が認められる。特に「山地・丘陵」では、切盛造成地が多く、盛土部分の自沈層の分布割合が高い。

表-1 地形区分と調査件数

地形区分	調査箇所	原地形面 0.75kN以下の 自沈層有り		盛土層 1.0kN以下の 自沈層有り		平均調査 深度 (m)
		件数	割合	件数	割合	
山地・丘陵	1,053	317	30.1%	379	36.0%	4.48
台地	1,699	892	52.5%	145	8.5%	4.67
低地	2,075	1,007	48.5%	341	16.4%	4.26
合計	4,827	2,216	45.9%	865	17.9%	-

表-2 台地面の細区分

微地形	調査箇所	原地形面 0.75kN以下の 自沈層有り		盛土層 1.0kN以下の 自沈層有り		平均調査 深度 (m)
		件数	割合	件数	割合	
岩石台地	1	0	0.0%	0	0.0%	8.42
砂礫質台地	1,580	797	50.4%	142	9.0%	4.75
火山灰台地	118	95	80.5%	3	2.5%	6.76
合計	1,699	892	52.5%	145	8.5%	-

表-3 低地面の細区分

微地形	調査箇所	原地形面 0.75kN以下の 自沈層有り		盛土層 1.0kN以下の 自沈層有り		平均調査 深度 (m)
		件数	割合	件数	割合	
谷底低地	308	154	50.0%	35	11.4%	4.84
扇状地	1,012	450	44.5%	209	20.7%	3.32
自然堤防・砂丘	251	136	54.2%	19	7.6%	5.01
後背湿地	256	165	64.5%	18	7.0%	6.20
旧河道・旧池沼	27	13	48.1%	7	25.9%	4.06
三角洲・海岸低地	221	89	40.3%	53	24.0%	5.17
合計	2,075	1,007	48.5%	341	16.4%	-

図-3には各地形面での最終深度ヒストグラムを示す。

採取深度ヒストグラムから、いずれの地形区分においても、2.0～3.0m 程度までの調査深度の分布が多く、深度が深くなる毎に頻度が減少する右裾引き型の形状を示しているが、10.0m 以上の数値がやや多く、離れ小島型の特徴も示している。

各ヒストグラムの全体的な形状は似ているが、深度

10.0m 以深の外れ値の構成を分析すると、それぞれ異なる特徴を示す。

「山地・丘陵」での外れ値の構成は、盛土層が厚い箇所を示している。「台地」では県南地方の火山灰台地に多く認められ、「低地」ではいわき市の海岸低地や後背湿地を中心に分布している。

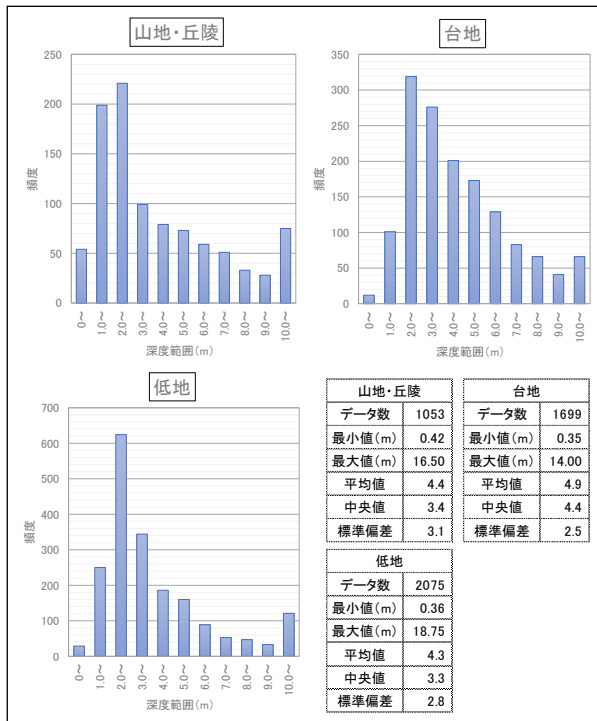


図-3 最終深度ヒストグラム

4. まとめ

SWS 試験による表層地盤情報と地形区分との関係性を整理した結果、調査地点の約半数で軟弱地盤が分布していた。SWS 試験の最終深度に地形区分による大きな差は無く、いずれも2.0～3.0m 程度までの調査深度の分布が多い傾向であったが、外れ値(最終深度10.0m 以深)を分析すると異なる特徴を示しており、盛土層の層厚や地盤の地域特性を反映した結果となっている。

最後に SWS 試験結果より作成したデータベースを活用することにより、事前調査・資料調査段階の精度向上に繋がると考える。また、小規模建築物における基礎地盤の地域特性の把握に対する一助になるよう、データの収集および精査を行っていきたい。

《引用・参考文献》

- 1) 若松加寿江・松岡昌志(2020): 地形・地盤分類250m メッシュマップの更新, 日本地震工学会誌, No. 40, pp. 24-27, (最終閲覧日2024年5月31日).  
<https://www.j-shis.bosai.go.jp/labs/wm2020/>.
- 2) 国土地理院 標準地図(に加筆), (最終閲覧日2024年5月31日).  
<https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html#std2>.

# 斜め電気式コーン貫入試験と水上音波探査を併用した湖沼における軟弱層の調査事例

(株)地圏総合コンサルタント ○相澤 明宏 小野里 直也 徳留 亮 平井 眞樹  
(株)地盤試験所 仲 優太郎

## 1. 概要

水域の地盤状況(軟弱層の分布や支持層)を確認するためには、通常は台船や水上足場上から調査を行うが、広域的に地盤状況を確認する場合は、多大な費用と時間が必要となる。本件では、軟弱層が厚く堆積し、水上足場が仮設できない現地状況であったため、護岸から張り出した足場を用いて電気式コーン貫入試験(CPTU)、標準貫入試験(SPT)および水上音波探査を併用し、300m×150m程度の水域における軟弱層の分布状況と盛土構造物の支持層出現深度を把握した事例を紹介する。

## 2. 調査内容

### (1) 調査項目・数量

調査内容を表-1に示す。

表-1 調査内容一覧表

位置	調査内容	試験深度	
		CPT	CPT+SPT
地点1	鉛直 90°	15.7	23.0
	斜め 45°	21.2	-
地点2	鉛直 90°	20.8	28.0
	斜め 60°	21.9	-
	斜め 45°	25.0	-
項目		延長(m)	
水上音波探査		1410.0	

### (2) 調査位置

CPTU、SPTの調査地点と水上音波探査の測線を図-1に示す。CPTUおよびSPTは、沖合に足場を張り出し、護岸から3m程度の位置で実施した。CPTUは現場での反力確保が難しいため、試験可能深度をせん断抵抗値10MPa程度までとした。

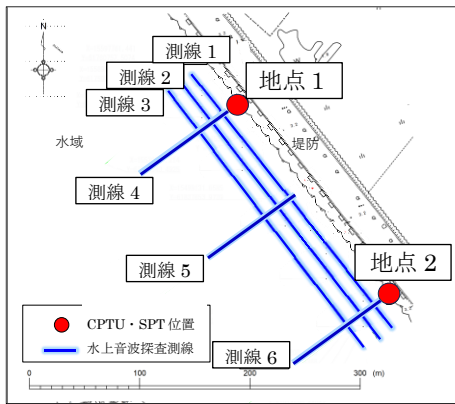


図-1 調査位置図

## 3. 調査結果

### (1) CPTU・SPT 試験結果

地点1では、鉛直CPTUにより、深度約15mまで換算N値=0の軟弱な粘性土を確認した。コーンが貫入不能とな

る砂質土が15.7mで出現し、それ以深は近傍(別孔)でSPTを実施するダブルサンディング工法に切り替えた。SPTにより、深度15mから層厚5m程度はN値4以上30未満の中間土層(沖積砂質土)と深度20mからN値30以上の地層(洪積砂質土)の支持層の分布を確認した。斜めCPTUは、限られた作業足場範囲の中から、周辺の軟弱層の分布を把握するために実施し、鉛直方向と同様に軟弱層の分布を確認した。CPTU試験結果から地質分布を推定する際は、SPT実施時のノンコアボーリング、周辺(陸地)での既往調査結果および「電気式コーン貫入試験方法」<sup>1)</sup>を参考とした(図-2参照)。各地層の地盤定数(湿潤密度、粘着力、内部摩擦角)は、CPTUによって得られた3成分(先端抵抗値、周面摩擦、間隙水圧)より換算式を用いて推定した。また、CPTUが貫入不能となった深度以下の地層の地盤定数は、SPTのN値からの換算値を採用した。

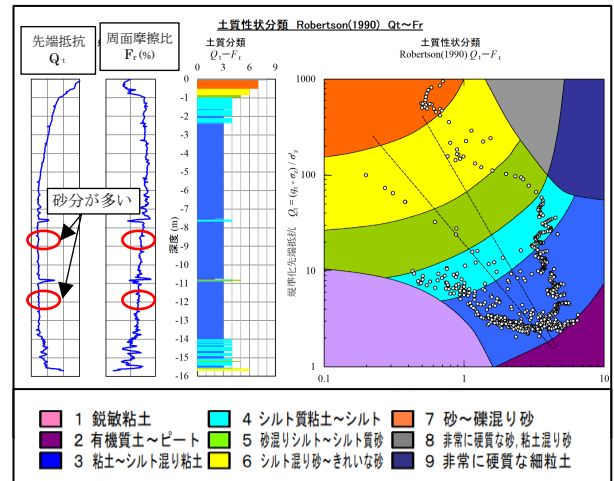


図-2 電気式コーン貫入試験結果(地点1 鉛直90°)

### (2) 水上音波探査結果

水上音波探査では、軟弱な粘性土とN値 $\geq 30$ の砂質土との地層境界を確認した。CPTUとSPTの結果に水上音波探査結果を統合したものを図-3に示す。

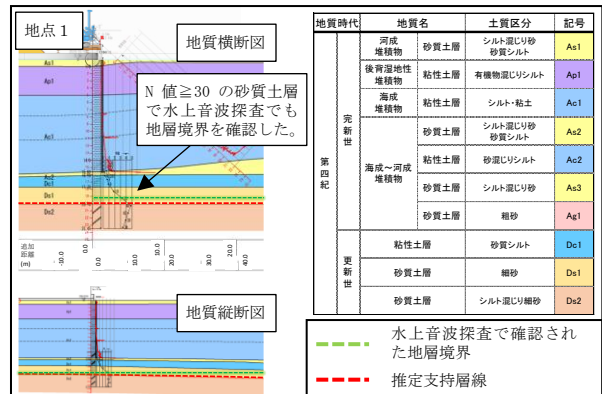


図-3 地質断面図



#### 4. 調査結果の評価

##### (1) 鉛直 CPTU と斜め CPTU の比較

斜め(45°, 60°)CPTU 試験結果を鉛直深度に換算し、鉛直 CPTU と重ね合わせた結果を図-4に示す。試験深度12m程度までの先端抵抗値と間隙水圧は、各角度の CPTU で概ね類似した結果が得られた。周面摩擦も同様の傾向を示すため、同一の軟弱な粘性土が水平方向に厚く分布していると推定した。さらに、各角度の CPTU の結果には、粘性土と砂質土の地層境界で3成分の顕著な変化が現れている。

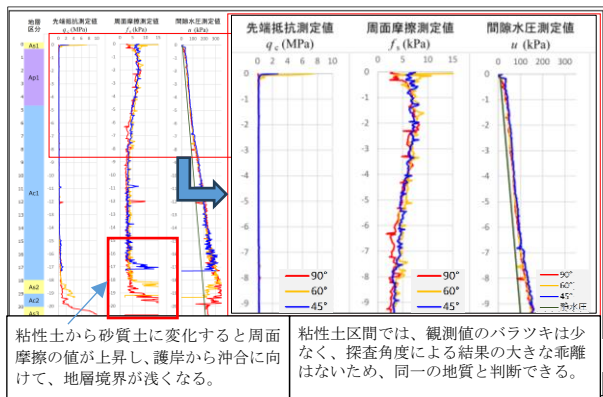


図-4 鉛直/斜め CPTU の N 値分布状況

##### (2) CPTU・SPT の比較

深度14.0~15.5mの CPTU の換算 N 値と SPT の N 値の比較結果を図-5に示す。深度14~15mまでの Ac1層は、SPT ではロッド自重の影響を受けてN値=0の自沈粘土であるが、CPTU による換算 N 値は N≒1 が得られており、深度15.5mの試験値についても同様の傾向である。

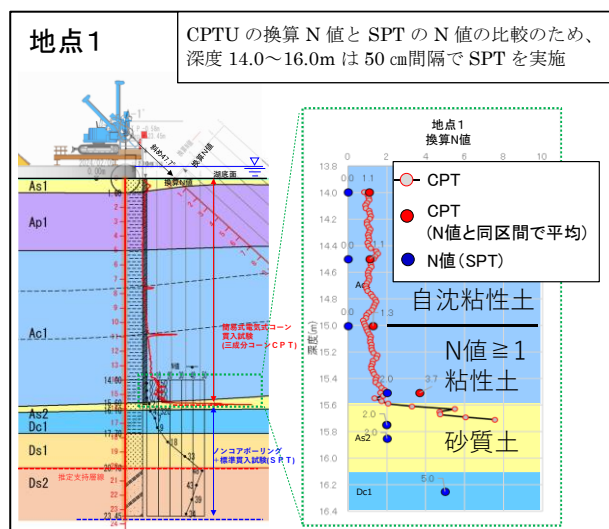


図-5 SPT と CPTU の N 値分布状況

##### (3) 地層境界の推定

CPTU により軟弱な粘性土層とその下位に分布する砂質土層との地層境界を確認し、ダブルサンディング法により N 値≧30 の支持層出現深度を確認した。SPT で N 値≧30 を示す深度において、水上音波探査でも不明瞭な

ながらも反射面が確認できたことから、探査範囲の支持層出現深度を面的に推定することができた。

#### 5. まとめ

本件で得た知見を以下に示す。

- ①水上足場の仮設が困難な現場でも、複数の調査手法(CPTU, SPT, 水上音波探査)を組み合わせることで、水域の地層分布と支持層出現深度を推定することができた。
- ②斜め CPTU の 3 成分(先端抵抗、周面摩擦、間隙水圧)は、鉛直 CPTU の測定値と概ね類似した結果が得られたため、試験角度による影響は小さいと考える。
- ③貫入能力に劣る鉛直 CPTU に SPT を組み合わせたダブルサンディングを行うことで、N 値の信頼性が低い軟弱地盤には CPTU を適用し、締まり具合の良い地層には SPT を適用することで、1 箇所ボーリングでより多くの地盤情報を得ることができた。
- ④時間的・費用的な制約から、室内土質試験が実施できない現場であったが、CPTU による換算値から、地盤定数を提案することができた。
- ⑤水上音波探査にて反射面が現れた深度は、SPT により N 値≧30 の砂質土層が出現した深度と概ね一致する。これは、上位に堆積する軟弱粘性土と比べて、締まり具合の違いが極端に違うことにより得られた結果であり、締まり具合が複雑に変化する場合や、漸移的に増減する場合には、水上音波探査の適用性は低いものとする。

#### 6. 今後の課題

本件より挙げられる今後の課題を以下に示す。

- ①角度が異なる CPTU の特徴をより多く把握するため、複雑な地層分布が想定される条件下においても CPTU を積極的に活用し、斜め CPTU の適用実績を増やすことが望まれる。
- ②鉛直 CPTU から推定される各種試験値について検証するためにも、ボーリングによるサンプリングと室内土質試験を行い、推定値と試験値の比較検討を行うことが望ましい。

#### 7. 謝辞

本調査にあたり、調査関係者の皆様、地元漁業協同組合の皆様、多大なご助言を頂いたこの場を借りて、感謝申し上げます。

#### 《引用・参考文献》

- 1) JGS1435-2012「電気式コーン貫入試験方法」：公益社団法人地盤工学会，地盤調査の方法と解説(2013) pp. 366-403



## 戸建て住宅の液状化対策への助成制度の検討

中央開発株式会社 ○竹田 和弘, 王寺 秀介, 岡田 直人, 大山 エンリック 誠慈

## 1. はじめに

液状化による被害といえば、2011年3月の東北地方太平洋沖地震、2016年4月の熊本地震、さらに、2024年1月に発生した令和6年能登半島地震が記憶に新しい。今後も液状化による被害は予想され、都心南部直下地震が発生した場合の液状化による全壊被害は約1500件と想定されており<sup>1)</sup>、戸建て住宅に対する事前液状化対策の普及が急務である。

東京都ではこれまで戸建て住宅の液状化対策に対する助成制度の検討を行っており、筆者らは委託を受け、新築住宅の建て主が事前液状化対策を実施する上での課題を整理し、助成要件を検討したのでここに報告する。

## 2. 調査内容

## (1) 先行自治体の取組み整理

はじめに、インターネットで事前対策に金銭的な助成をする先行自治体事例を収集し、併せて助成内容、対象となる調査/対策工法及び運用実績について整理した。

全国的に見ても戸建て住宅への液状化の事前対策に費用助成を行う例は非常に稀であり、筆者らが調査した限りでは二自治体であった。その中で東京都葛飾区は、助成制度の先駆者的な存在であり、地盤調査と液状化対策の両方に助成をしている。そのため、東京都としてはこの葛飾区の助成制度を参考に支援の在り方を進めていくこととなった。

## (2) 建築士へのヒアリング

工務店在籍の建築士に個別ヒアリングを実施し、事前液状化対策をする上での課題を以下に整理した。

## ①液状化対策費用の負担

通常の地盤改良工法の場合は約80~250万円程度であり、さらに液状化への効果が期待できる工法となると約200~1000万円程度要し<sup>2)</sup>、建て主個人で賄うことは困難である。よって、適切な金額助成が必要となる。

## ②液状化対策検討方法の確立と工法の開発

現在、液状化対策として第三者機関から認証を受けた工法は数少ない。建て主に液状化対策まで提案し実施するかは建築士の裁量にも委ねられている。こうした検討方法の確立や新たな対策工法の開発が課題である。

## ③一般市民の液状化に対する意識の向上

一般市民には、液状化被害によって住宅に住めなくなるというイメージがないため、対策が必要だという発想になりにくい。

## 3. 東京都の支援の在り方の検討

先行自治体の助成制度を参考に、前述の液状化対策の課題を反映させた助成制度を創設することが望ましい。

そこで、葛飾区についてヒアリングを実施し、助成制度の運用における課題を整理した上で、東京都の支援の在り方を検討した。

## (1) 液状化調査の試験深度について

## ①葛飾区の調査助成の中身

葛飾区が準拠している建築基礎構造設計指針(2019年、日本建築学会)ではGL-20mまで液状化の危険性があると定めているため<sup>3)</sup>、助成対象とする現地調査の要件を表-1に示すように「JIS A 1219に規定する標準貫入試験」及び「調査深度20m以上」と定めている。結果としてこれらは機械ボーリングによる調査に限定している。ボー

表-1 先行自治体の整理

自治体	助成内容	調査/対策工法	運用実績
東京都 葛飾区	地盤調査に要した費用の10/10 (限度額: 35万円)	現地調査: JIS A 1219に規定する標準貫入試験(試験深度は20m以上とする) 土質試験, 地下水位測定	(2014年運用開始。開始当時は1/3の助成, 2016年から10/10の助成) 年間約10件程度*
	液状化対策工事費用の1/2 (限度額: 90万円)	・液状化層の土とセメント系固化材を混ぜる工法(敷地の地盤改良部を非液状化層に到達させるもの) ・丸太を使った軟弱地盤対策(LP-LiC工法)	(2016年運用開始) これまでに5件*
愛知県 飛島村	液状化対策工事費用の1/4 (上限: 25万円)	表層改良工法, 柱状地盤改良, 鋼管杭工法 ※一級又は二級建築士が液状化を考慮した地盤改良であること	(2021年度運用開始) 2021年度: 8件, 22年度: 8件, 23年度: 9件(2024年2月29日時点)* 液状化に有効であるとの証明が困難で助成対象外となった事例がある。

※運用実績については、葛飾区は3章に記すヒアリング、飛島村は電話・メールにて得られた情報である。

リング調査は以下の理由などで、戸建て住宅には適合せず助成制度の実績が伸びていない。

- ・ 小規模建築の場合、十分な調査スペースをとれない。
- ・ 解体工事や事前準備等を含めてボーリング調査では通常2週間程度調査期間を要する。

#### ②都としての改善事項

宅地の液状化調査でも、調査深度10m程度のSWS試験で実施することが主流になりつつある。また『リスクコミュニケーションを取るための液状化ハザードマップ作成の手引き』（2021年、国土交通省都市局都市安全課）の中では、既存のボーリング調査結果等の地盤情報が充実していない自治体を対象に深度10m程度のSWS試験による液状化判定結果 PL10を有効活用することを奨励している<sup>4)</sup>。こうした背景をふまえ、東京都としてはSWS試験（JIS A 1221に規定するスクリーウエイト貫入試験）の運用並びに調査深度10mの調査を助成対象に加える方針となった。

### (2) 液状化対策への助成要件

#### ①対策助成の運用課題

葛飾区では、建築物のための改良地盤の設計及び品質管理指針（（一財）日本建築センター・（一財）ベターリビング）（以下、「改良指針」）<sup>5)</sup>に従い、土とセメント系固化材を混ぜて改良体をつくる地盤改良工法を助成対象としている。その中でも液状化対策の品質水準の確認として「敷地の地盤改良部を非液状化層に到達させるもの」との記載がある。

建築士へのヒアリングの結果からも、液状化対策の検討方法は建築士に委ねられており、その検討方法の確立が課題である。また、対策工法が液状化に対して有効な性能であるかを行政職員が審査することが困難であることも課題である。

#### ②建設技術審査証明技術の活用

そこで、民間によって開発された新技術に対して、その性能を客観的に証明し、その普及活動に努める事業「建設技術審査証明事業」に着目した。この中で、戸建ての地盤改良技術に審査証明を発行している主な機関には（一財）ベターリビングと（一財）日本建築センターがある。上記二機関は改良指針を発刊しており、地盤改良の品質水準の審査を行う立場でもあるため、建設技術審査証明技術を採用した工法も助成対象に追加した。

### (3) 東京都としての助成要件

以上の検討を踏まえ、東京都としては地盤調査・液状化対策として以下の要件を助成対象として定めている。なお、地盤調査に関しても同様に建設技術審査証明を助成対象の工法としている。これは、（一財）ベターリビングにより審査証明を受けたSWS試験を改良したSDS試験等の運用を想定したものである。

#### ①助成対象とする地盤調査

- ・ JIS A 1219に規定する標準貫入試験

- ・ JIS A 1221に規定するスクリーウエイト貫入試験（SWS試験）
- ・ 建設技術審査証明技術であること。

#### ②助成対象とする液状化対策

「改良地盤の設計及び品質管理指針（日本建築センター・ベターリビング発行）」及び「宅地の液状化判定に係る設計指針（国土交通省）」に従って、敷地の地盤改良部を非液状化層に到達させる工事又は建設技術審査証明技術を採用した工事であること。

## 4. 今後の検討課題・取組

幅広い液状化対策に対して助成するために、現時点では建設技術審査証明取得技術を対象としている。ただ、審査証明の中で液状化対策であると明確になっているのは葛飾区が助成対象としているLP-Lic工法（技審証第3004号）、あるいは、（一財）ベターリビングが審査証明事業と別途に実施している「地盤の液状化対策審査・保証業務」（以下、「審査・保証業務」）の対象となっている積水ハウス（株）のSHEAD工法（BL審査証明-025）、旭化成建材（株）のCSV工法（BL審査証明-050）と限られている。よって、審査・保証業務の対象となる工法を増やす働きかけをするなど、引き続き検討をする必要がある。

また、助成制度を有効に活用される方策の検討も重要になってくる。一般市民の液状化に対する意識の向上には、液状化リスクの理解を高めるリーフレットを作成し普及・啓発を行うなど、建て主に対する早めの訴求も重要であると考えます。

### 《謝辞》

本文は「令和5年度建築物の液状化対策に関する課題整理等調査委託（東京都）」内容を基に執筆したものであり、東京都都市整備局市街地建築部建築企画課の皆様がこの場を借りて感謝申し上げます。この論文が東京都の取り組む事前液状化対策の周知の一助になれば幸いです。

### 《引用・参考文献》

- 1) 東京都防災会議：首都直下地震等による東京の被害想定（2022）5章想定される被害，pp. 8.
- 2) 住宅性能表示制度における「液状化に関する参考情報の提供」に関する手引き：建物の液状化対策工法およびその実施状況に関する調査，pp. 58-62.
- 3) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針（2019），pp. 54-62.
- 4) 国土交通省都市局都市安全課：リスクコミュニケーションを取るための液状化ハザードマップ作成の手引き（2021），本編 pp. 34，詳細資料編 pp. 72.
- 5) （一財）日本建築センター・（一財）ベターリビング：建築物のための改良地盤の設計及び品質管理指針（2018），pp. 114-130.

# 液状化検討にともなう調査事例

株式会社キタック ○山岸 由佳, 小池 健, 佐藤 文彦

## 1. はじめに

A 飛行場及び B 飛行場における液状化検討及び耐震検討に必要な地質調査（標準貫入試験併用のボーリング、トリプルサンプリング、PS 検層、常時微動計測、土の繰返し非排水三軸試験）の実施事例ならびに調査実施にあたり工夫した点を紹介する。

## 2. 調査方針及び工夫点

液状化検討・耐震検討の対象が飛行場であるため、「港湾の施設の技術上の基準・同解説<sup>5)</sup>（平成30年5月、(公社)日本港湾協会）」に従い調査を実施した。

### (1) ボーリング調査

飛行場全体の地盤特性の把握と液状化検討のために、ボーリングを配置し、標準貫入試験を併用して実施した。

### (2) トリプルサンプリング

ボーリング調査の結果、A 飛行場では部分的ではあるが、相対的に緩い砂質土が分布し、地震時に液状化発生の可能性が懸念された。また、B 飛行場では細粒分を多く含む砂質土が分布し、同様に液状化発生の可能性が懸念された。このため、トリプルサンプリングによる乱さない試料採取を実施した。

なお、採取した試料を乗用車にて県外の土質試験室に運搬する必要があり、運搬時に車の振動により試料が液状化し強度低下する可能性が懸念された。このため現地にてドライアイスを用いた凍結処理を行い、凍結させた状態で試料を運搬した。この際凍結時の膨張により土の構造破壊の発生を防ぐため、間隙水のある程度脱水させた後に凍結処理を行った。ただし、B 飛行場の試料は細粒分が多かったため、凍結処理は実施せず、間隙水の脱水のみ実施して試料を運搬した。

### (3) PS 検層

地盤の深度方向の弾性波速度分布の把握と工学的基礎を確認することを目的として実施した。本調査では、地表で起振するダウンホール法で実施した。

PS 検層実施時は、孔壁保護のために塩ビ管を挿入後に試験を実施することが多いが、本調査では測定精度を高めるために、裸孔にて測定を実施した。

### (4) 常時微動計測

飛行場内および周辺のサイト増幅特性を把握するために実施した。車両及び工場稼働等によるノイズの影響を避けるために夜間に測定を行った。

### (5) 土の繰返し非排水三軸試験

トリプルサンプリングで採取した試料の液状化強度を求めるために実施した。併せて標準貫入試験試料を用い

て、液状化判定の基礎資料として、各ボーリング孔で原則1m 毎に一般物理試験（土粒子の密度・含水比・粒度・液性限界・塑性限界）を実施した。

## 3. 地盤特性と調査結果

A 飛行場は、表層部に層厚1~2m の粘性土が分布し、以深には N 値50以上を示す玉石混じり砂礫層が主に分布している。ただし、砂礫層の上部には N 値が15前後の緩い砂質土が層厚1m 程度分布している。

表-1 A 飛行場の地質構成表

時代	地層名	記号	N値 (採用N値)	土質・岩質
完新世	盛土層	B	-	玉石混じり砂礫、砂礫、玉石混じり粘土、礫混り粘土
		Ac1	1~27 (7)	シルト、砂質シルト、シルト質粘土
第四紀	更新世	Ag1	8~166.7 (33)	玉石混じり砂礫
		Ac2	4~13 (8)	有機質粘土
		Ac3	2.5~21 (10)	砂質シルト、シルト、粘土質シルト
		Ag2	21~300 (56)	玉石混じり砂礫、砂礫
		As1	11~62.5 (37)	細砂、シルト質細砂
		As2	28~71.4 (44)	細砂

### (1) PS 検層結果

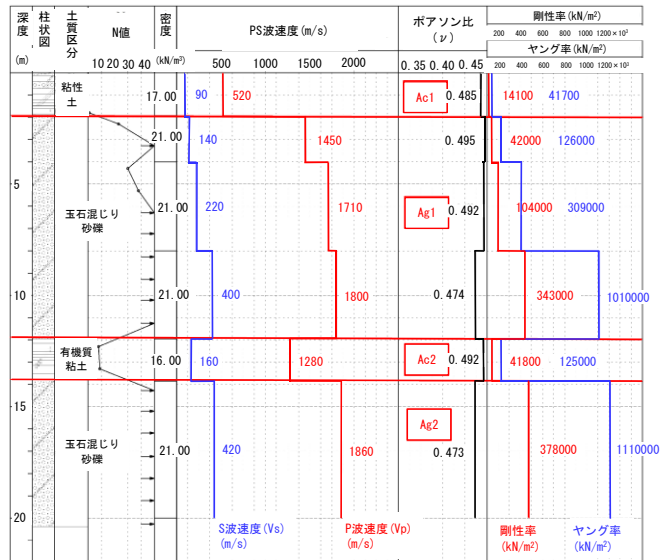


図-1 A 飛行場における PS 検層結果

### (2) 常時微動計測結果

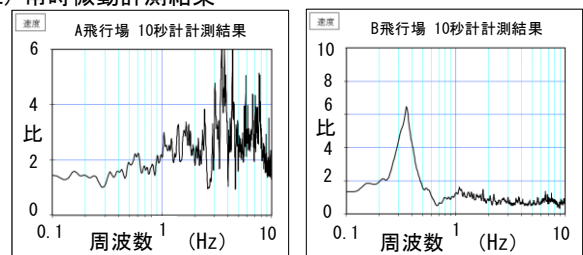


図-2 常時微動計測結果 (H/V スペクトル図)



(3) 土の繰返し非排水三軸試験結果

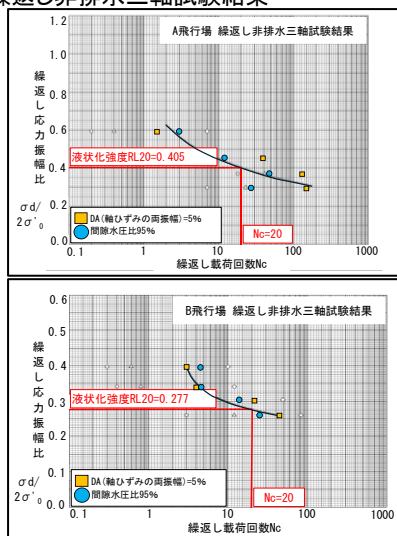


図-3 各試料の試験結果 (上: A 飛行場、下: B 飛行場)

4. 考察

(1) PS 検層における孔内保護の有無について

本調査では、精度の良いデータ取得のため、掘削後に孔内洗浄を実施した後、裸孔にて PS 検層を実施した。

伊藤ほか, 1998<sup>1)</sup>では、PS 検層等のボーリング孔を利用した物理検層は裸孔が原則との記載があり、孔壁崩壊が発生しやすい地質でなければ、保孔管を極力使用しない方がより良好なデータが取得できると考えられる。

また、水江ほか, 2020<sup>2)</sup>では、裸孔時と孔内保護実施時における S 波速度の比較を行っており、孔内保護実施時に、S 波速度がわずかに速くなるという結果が得られている。

以上より、本調査では裸孔で実施した効果を検証できなかったものの、裸孔にて PS 検層を実施することでより正確な S 波速度の値を取得することが可能であると考えられる。今後、実施の際には、極力裸孔での実施を検討することが望ましい。

(2) 常時微動計測の夜間測定と微動の周期特性について

本調査では、精度の良いデータ取得のため、車両及び工場稼働等によるノイズが比較的少ない夜間に測定を実施した。しかし、微小地震や風、海洋の波浪等の自然現象によるノイズを完全に避けることはできない。

森, 1981<sup>3)</sup>では、時間帯及び風速等の外的要因による常時微動計測結果への影響について考察を行っており、交通量の少ない夜間に計測した方が周期特性、振幅特性が安定する傾向にあるとしている。また、夜間は卓越周期が長くなるが、その原因として、昼間の短周期大振幅の波に隠れていた長周期小振幅の波が解析に現れやすいためとしており、この長周期小振幅の波が現れやすい時間帯が計測に適していると考えられるとしている。図-2で示した H/V スペクトル図より、長周期、短周期でそれぞれ卓越周期が検出されており、本調査では夜間測定で問題無かったと考えられる。

一般的に、短周期微動は交通振動や工場機械の振動、長周期微動は風・波浪によるものとされている<sup>6)</sup>。また、地盤の常時微動の特性として、岩盤などの硬い地盤では 0.1 秒程度の短周期振動が卓越し、沖積地盤などの軟質な地盤であるほど長周期になるとされている<sup>6)</sup>。

地盤のサイト増幅特性とは、地震基盤上方に存在する堆積層が地震動に及ぼす影響について示したものである<sup>5)</sup>。このため、地盤のサイト増幅特性を把握するためには地中深部の微動を捉える必要があり、長周期の微動ほど深部の地盤構造を反映していると考えられている<sup>4)</sup>。

以上より、長周期の微動を検出できる 10 秒計を使用し、計測を行ったことで、目的に見合った調査を実施することが出来た。

(3) 繰返し非排水三軸試験の液状化強度の違いについて

本調査では、比較的緩い砂質土層 (A 飛行場) と細粒分の多い砂質土層 (B 飛行場) でそれぞれ繰返し非排水三軸試験を実施した。図-3より、B 飛行場の試料のほうが、液状化強度が小さい値を示した。細粒分の多い砂質土層の液状化特性については、様々な研究がなされており、液状化強度 RL20 と塑性指数 Ip には一定の相関関係がある可能性が指摘されている<sup>7)</sup>。B 飛行場の試料では前記のような傾向が見られた。今後、試料数を増やして相関性を検証する必要がある。

5. まとめ

本調査では、様々な工夫を行い、必要なデータをより精度良く取得できたと考える。今後、様々な現場を経験して、データを蓄積・分析し、精度良くデータを得られる工夫について検討していきたい。

《引用・参考文献》

- 1) 伊藤芳朗, 楠見晴重, 竹内篤雄 (1998) : 斜面調査のための物理探査: 地すべり・地下水・岩盤評価, pp. 243-245, 吉井書店.
- 2) 水江邦夫, 田口雅章, 小松洋之, 福田将広 (2020) : 長期測定に適した PS 検層測定孔設置の検証, 全地連技術フォーラム2020論文集, 論文 No. 21.
- 3) 森芳信 (1981) : 地盤の常時微動特性と工学的利用, 土木学会論文報告集, 第313号.
- 4) 鏡味洋史 (1988) : 微動観測とその工学的利用, 地学雑誌, 97-5
- 5) 港湾の施設の技術上の基準・同解説 (2018) : 公益社団法人日本港湾協会, pp. 364-365.
- 6) 森芳信 (1990) : 地盤の微動に現われるやや長周期成分についての実測による検討, 土木学会論文集, 第424号.
- 7) 桑野二郎, サブコタビノッド, 橋爪秀夫, 高原健吾 (1993) : 細粒分を含む砂の液状化特性, 土と基礎, 41-7.