

ピエゾドライブコーン試験

澤田 俊一*

* SAWADA Shun-ichi、PDC コンソーシアム 幹事 さいたま市北区土呂町 2-61-5

1. はじめに

ピエゾドライブコーン¹⁾は、地盤の液状化のしやすさを判定するために開発された新しい地盤調査技術である。地盤調査法の中ではサウンディング試験に分類される。

新技術の活用・情報の共有及び提供を目的とした新技術情報提供システム（New Technology Information System：NETIS²⁾）に登録（TH-100032-VR）され、誰でも検索して閲覧可能な技術となっている。ピエゾドライブコーンは、「地盤の硬さ（締めり具合；N値）及び土の種類判別（細粒分含有率（ F_c ））を知り、地盤の液状化強度を原位置のみで知る事が出来る地盤調査技術であり、本技術の活用により迅速で低コストに液状化判定が可能な技術」と紹介されている。

ピエゾドライブコーンは英語表記でPiezo Drive Coneと表記され、“PDC（ピー・ディ・シー）”と略して呼ばれている。Piezoの意味は“Piezometer：液体の圧縮率を測定する機械の名称”から、Driveは“打ち込む”の意味、Coneは“円錐”の単語を組み合わせ命名されている。つまり、“円錐を打撃貫入するときに地盤の間隙水圧を測定する試験装置”という意味を持った地盤調査装置である。

2. 地盤の液状化現象

2011年東北地方太平洋地震では、東京湾岸の埋立地をはじめ河川沿いの内陸造成地に於いて、宅地の液状化現象によって多くの戸建住宅が沈下・傾斜被害が発生した。

（写真-1）³⁾

地盤の液状化現象は、地震力が作用することにより保っていた土粒子同士の組み合わせが外れ、土粒子が間隙水中に浮遊し、あたかも地盤が液体状の挙動を示す現象と説明されている⁴⁾。液状化した地盤では上部建物を支える支持力が失われ、戸建住宅では沈下や傾斜被害が発生する。さらに液状化した土粒子は間隙水とともに地表面から噴出する噴砂現象が生じる。（図-1）

土木構造物と同様に、戸建住宅でも建物直下の宅地の浅部地盤が液状化する可能性がある場合、液状化に対する予防措置を施すことは重要なことである。液状化の判定方法は設計基準等⁵⁾に示されている。液状化が生じる地盤の特徴は、地盤の硬さと土の種類判別、そして地下水位が大きく関与する。表-1に液状化の判定に必要な“項



写真-1 液状化で傾斜した交番（浦安市）



図-1 液状化現象で被災した戸建住宅のイメージ

表-1 液状化の判定に必要な指標

項目	液状化の発生しやすさ	
	発生しやすい	発生しにくい
地下水位	浅い	深い
地盤の硬さ (締めり具合)	軟らかい (緩い)	硬い (締まっている)
土の種類 (粒度特性)	砂質土	粘性土

目”と、液状化のしやすさを定性的に表現した表を示す。当然のことながら、地盤が液状化するのかを判定するには地震動の大小も大きく関与する。揺れの小さな地震では液状化しなくても、揺れが大きな場合には液状化すると判定される。つまり、液状化判定に必要な地盤定数には定量値が求められる。PDCは表-1に示した地下水位、地盤の硬さ、土の種類判別を定量値として計測する地盤調査技術である。

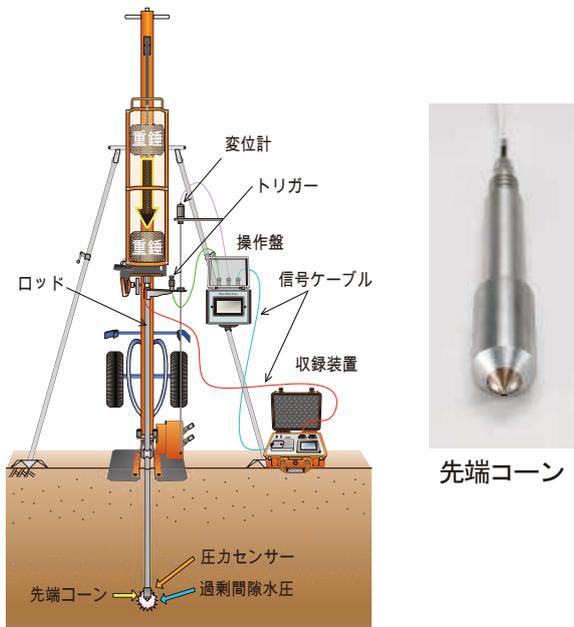


図-2 PDC 試験装置の概要図



先端コーン

3. ピエゾドライブコーン (PDC) の概要

PDCは動的貫入試験であり、地盤内にコーンを打撃貫入して1打撃毎の地盤内の貫入量から地盤の硬さを測定する。更にコーン先端位置に設置された圧力センサーで地盤内に発生する間隙水圧を測定し、応答水圧値から土の種類判別を行うことができる。試験から得られた地盤の硬さと土の種類判別、さらに試験後の調査孔を利用した地下水位と判定に用いる想定地震動の大きさを規定することにより液状化発生の有無を判定する。PDC装置は図-2に示す1) 動的貫入装置、2) 先端コーンとロッド&信号ケーブル、3) 計測システムの主に3つの部位から構成される。

1) 動的貫入装置

動的貫入装置は標準として図-3中央に示した軽量型動的コーン貫入試験（ミニラム：MRS）を用いている。液状化対策の実施確認を目的として締まった改良地盤で深い深度までの調査が必要になり、図-3右に示したスウェーデン式ラムサウンディング（SRS）仕様が用意されている。一方、図-3左に示した戸建住宅等の軽量建築物を対象として浅部の地盤の液状化調査に特化したマイクロラムサウンディング（μRS）も開発されている。写真-2には、μRSを小型乗用車に搭載した状況も示した。用途・目的・深度・地盤の硬さによって3種類の貫入装置を選ぶことができる。

表-2には、貫入装置の仕様・先端コーンの寸法・単位貫入量当たりのエネルギー等の貫入仕様を示した。

2) 先端コーン、ロッド&信号ケーブル

図-4にMRS用の先端コーンの断面図を示す。先端コーン内部には圧力計が内蔵され、先端コーン位置には地盤中の間隙圧のみを伝搬するポーラスストーンが組み込まれている。水圧計の電気信号を操作盤及び収録装置に伝搬する4芯の信号ケーブルを通すためにロッドは中空構造となっ

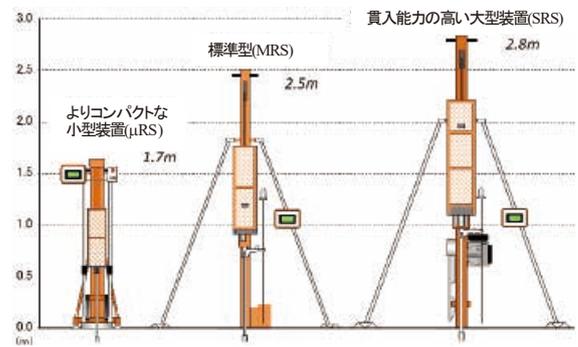


図-3 動的貫入装置（3兄弟）の概要図



写真-2 μRS 仕様の PDC の車載状況

表-2 動的貫入試験の仕様概要

動的貫入試験仕様		SRS	MRS	μRS	
ハンマー	ハンマー直径	D_h (mm)	195	160	135
	ハンマー長	L_h (mm)	270	190	200
	ハンマー質量	m (kg)	63.5	30.0	20.0
	落下高さ	H (mm)	500	350	250
コーン	コーン先端角	θ_c (°)	90	90	90
	コーンマントル長	L_c (mm)	90.0	69.0	30.0
	コーン直径	D_c (mm)	45	36.6	25
	コーン断面積	A_c (mm ²)	1590.4	1052.1	490.9
打撃エネルギー	mgH (kJ)	0.311	0.103	0.049	
打撃回数測定時の貫入量	P (m)	0.2	0.2	0.2	
単位面積・単位貫入量当たりのエネルギー	E (kJ/m ² /m)	979.2	489.5	499.6	

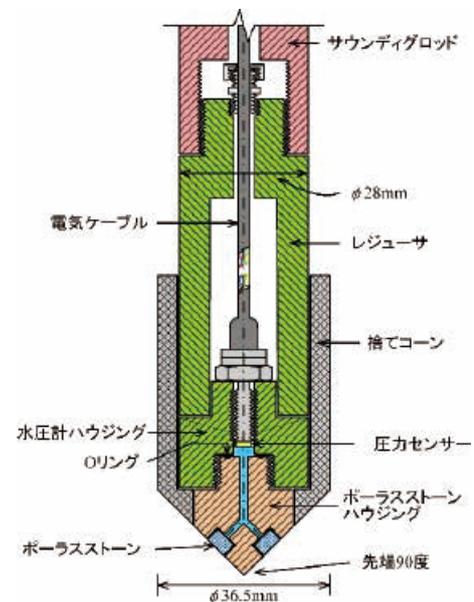


図-4 先端コーン（MRS仕様）の断面図

ている。

3) 計測システム

計測システムは打撃貫入時の貫入量と貫入速度を計測可能な変位計、打撃タイミングを感知するトリガーを採用している。高速で大容量となる計測データを記録する収録装置と共に、貫入装置操作者が同時に収録操作も出来る手元操作盤が設けられている。

4. 地盤定数の評価方法と液状化判定

PDCで評価される地盤定数は地盤の硬さと土の種類判別である。液状化判定に必要な地下水位は試験終了後の調査孔を利用して水位計等で計測して採用している。

1) 地盤の硬さ

PDCは1打撃毎の貫入量から貫入抵抗 N_d 値を評価している。この N_d 値はボーリング調査で実施される標準貫入試験結果(SPT)のN値と等価な貫入抵抗値となる。

2) 土の種類判別

コーン先端で測定された地盤内の間隙水圧の応答(間隙水圧比(u_R/σ'_v))から細粒分含有率(F_C)を推定している。毎回の打撃貫入において、打撃貫入中及び打撃貫入直後の間隙水圧応答の時刻歴を記録する。図-5に代表的な砂質土及び粘性土での間隙水圧応答記録を示す。砂質土と粘性土では、貫入直後(図-5では200ms後)の間隙水圧応答値 u_R に差異があることが判る。PDCでは、図-6に示した間隙水圧比(u_R/σ'_v)から細粒分含有率(F_C)を推定している。

3) 液状化判定

PDCを用いた液状化判定の流れを図-7に示す。

液状化判定においては、有効上載圧を算定する必要があり土の単位体積重量(γ_t)が必要になる。PDCでは直接 γ_t は測定できない。そこで、地盤の硬さと土の種類判別から γ_t を再推定⁶⁾する仕組みとしている。図に示した γ_t の再推定イタレーションは自動計算処理が可能となっている。

PDCの液状化判定の流れに従って評価した貫入抵抗 N_d 値、細粒分含有率(F_C)、飽和土層の液状化抵抗比(R)そして液状化発生に対する安全率(F_L)を図-8に示す。同図には、ボーリング調査、SPTそして室内土質試験から得られる、N値、 F_C 、 R そして F_L もPDCの結果と比較している。両者は良く一致するとともに、ボーリング調査を超える高解像の結果が得られる。

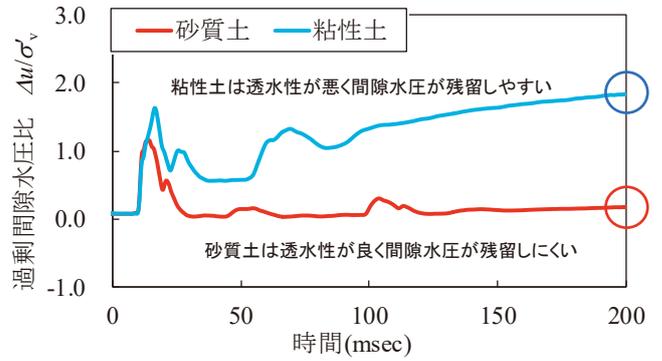


図-5 代表的な砂質土及び粘性土での間隙水圧応答値

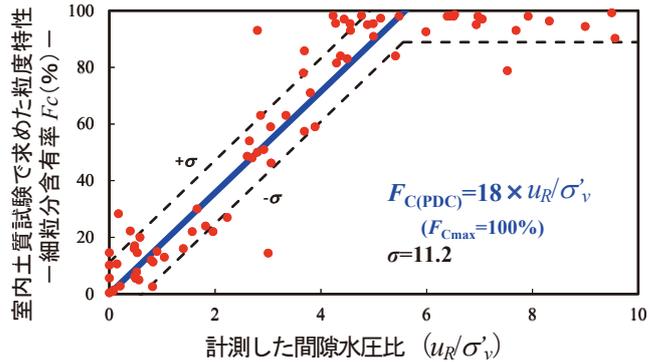


図-6 間隙水圧比と細粒分含有率

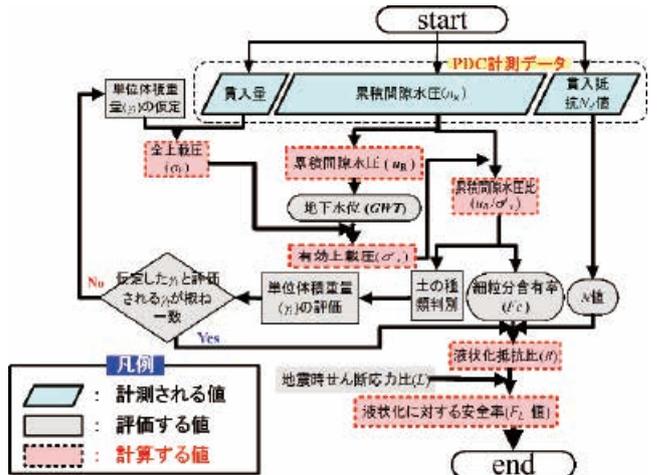


図-7 PDCによる液状化判定の流れ

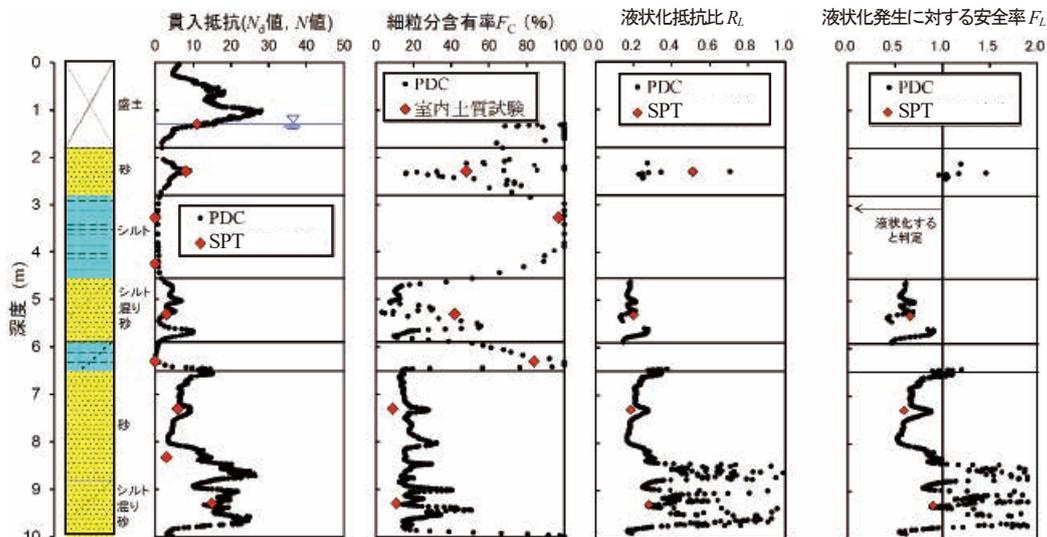


図-8 PDCによる液状化判定結果の一例

5. PDC利用に当たっての留意点

最初に記した様にPDCは地盤調査法ではサウンディング試験に分類される。ボーリングでの、削孔と原位置試験が別々に行われ、常に孔壁とクリアランスを十分に保って実施されるSPTとは状況が異なる。サウンディング試験では、常に貫入ロッドと地盤との接触に伴うエネルギー損失が懸念される⁷⁾。結果、一定深度（MRS仕様で概ね深度10m）以深ではPDCで得られる N_d 値がSPTで得られる N 値よりも大きく計測される場合がある。そのため、深度10m以深を調査対象とする場合には、先端コーン位置にロードセル（荷重計）を組み込んだintelligent type PDC (iPDC)⁷⁾を採用するなどして打撃エネルギーの損失分に留意する必要がある。

一方、先端コーンの受圧面となるポーラストーン部位では、不飽和地盤内の貫入ではコーン内部の脱気度を保つためにも地下水位以浅での打撃貫入を少なくする必要がある。これまでの経験から地下水位が調査開始深度から2m以内であれば、問題無いと確認されている。2m以上の不飽和土層を打撃貫入する必要がある場合には、地下水位近くまでは写真-3に示す水圧計が組み込まれていない“回収コーン”を用いた先行調査の後にPDCを実施する等調査方法に留意する必要がある。

また、PDCは液状化が懸念される軟弱地盤を対象に設計・製作された地盤調査技術である。巨礫やコンクリート殻等では貫入不能となるばかりではなく、水圧センサの破損が生じてしまう試験装置であることに留意する必要がある。

6. おわりに

国土交通省のi-Construction構想及び技術のAI化に伴い地盤調査の分野にもヒューマンエラーを排除するために自動計測化やビックデータを活用したAI技術導入が求められている。PDCは、計測の自動化と共に計測情報のデジタル化技術および通信技術を活用した地盤の液状化判定のリアルタイム化を目指して開発された新技術である。住宅の地盤品質を調べる地盤調査法においても、他の技術分野と同様にICTを活用した新しい革新技術を導入して地盤調査のシステム化を推し進める重要なターニングポイントを迎えている様である。



写真-3 回収用先端コーン（MRS仕様）

参考文献

- 1) Sawada S. Evaluation of differential settlement following liquefaction using Piezo Drive Cone. In proceedings of the 17th International Conference on Geotechnical Engineering, pp. 1064-1067, Alexandria, Egypt, 2009.
- 2) 国土交通省, 新技術情報提供システム (New Technology Information System : NETIS), ピエゾドライブコーン, <http://www.netis.mlit.go.jp/NetisRev/Search/NtDetail1.asp?REG_NO=TH-100032&TabType=2&nt=nt>, [2017. 11. 30閲覧].
- 3) 浦安市, 浦安市液状化対策技術検討調査委員会 資料・議事概要資料, 1-4 東日本大震災への対応, <http://www.city.urayasu.lg.jp/_res/projects/default_project/_page_/001/002/934/shiryo1_4taio_r.pdf>, [2017. 11. 30閲覧].
- 4) (公益社団法人)地盤工学会, ドクターモグの地盤工学入門, 2. 地震・大雨と地盤災害, 地震による地盤災害(液状化), <https://www.jiban.or.jp/images/file/2-3s.pdf>, [2017. 11. 30閲覧].
- 5) 例えば、(社)日本建築学会：建築基礎構造設計指針, pp. 61-65, 2001.
- 6) 例えば、東日本高速道路株式会社・中日本高速道路株式会社・西日本高速道路株式会社：設計要領第一集土工, 保全編・建設編, p参1-2, 2016.
- 7) Uemura K. & Sawada S. Development of the PDC equipment with the blow energy measurement and its application. In proceedings of the 5th International Conference on Geotechnical Engineering for Disaster Mitigation and Rehabilitation, pp. 49-56, Taipei, Taiwan, 2017.