

ピエゾドライブコーン (液状化ポテンシャルサウンディング)

貞宗 太郎

応用地質株式会社 岡山支店



ピエゾドライブコーン（液状化ポテンシャルサウンディング）は、動的貫入試験装置の先端コーンに内蔵した間隙水圧計で打撃貫入時の過剰間隙水圧 Δu を計測し、地盤のN値と細粒分含有率 F_c を把握する新しいサウンディング調査法である。打撃貫入することにより、1打撃毎にN値と細粒分含有率 F_c を評価することができ、各種設計基準に準じた液状化判定を行うことができる。本論文では、調査法の概要と地盤特性の評価法や液状化判定の方法、河川堤防の耐震点検での適用事例について紹介する。

キーワード：原位置試験，サウンディング，液状化，新技術，河川堤防

1. はじめに

地震時における地盤の液状化判定を行う際、N値と地下水位、細粒分含有率 F_c の把握が必要である。従来、これらの情報は、調査ボーリングにおける標準貫入試験、掘進時の地下水位、さらにはボーリングで得られる試料を用いた室内土質試験で得ている。そのため、調査ボーリング後、室内土質試験の結果を待たないと液状化判定を行えず、この時間や費用が設計におけるボトルネックとなるケースがあった。

本論文で紹介するピエゾドライブコーン（液状化ポテンシャルサウンディング：Piezo Drive cone（以降“PDC”））は、これらの地盤情報を原位置試験のみで評価できる新しいサウンディング調査法である。PDCをボーリング調査の補間として用いることにより、地盤調査の工期短縮は勿論、調査コストの縮減も可能である。

2. 試験装置の概要

PDCは、動的貫入試験装置を用いて地盤の貫入抵抗 N_d 値を計測するとともに、先端コーン周辺で発生する過剰間隙水圧 Δu を計測することにより細粒分含有率 F_c を評価する原位置試験である。

PDCの測定装置は、図-1 および写真-1 に示すとおりであり、以下の装置から構成される。

- ① 先端コーン：打撃貫入時に地盤で発生する過剰間隙水圧応答を計測する圧力センサーを内蔵。
- ② 変位計：打撃による動的貫入量をロッド頂部において計測する磁歪リニア変位計。
- ③ トリガー：重錘が自由落下によりロッキングヘッドを打撃するタイミング（打撃貫入開始）を検知

する近接センサー。

- ④ データ収録装置：打撃貫入時の貫入量と間隙水圧応答を高速サンプリング・収録する装置。
- ⑤ 動的貫入装置：重錘の自由落下による打撃エネルギーで先端コーンを地盤に貫入する装置。動的貫入装置の標準仕様は、ミニラムサウンディング試験機（以降“MRS”）である。その他、標準仕様とはしていないが、オートマチックラムサウンディング（以降“SRS”）にも装着可能なアタッチメントも準備されている。

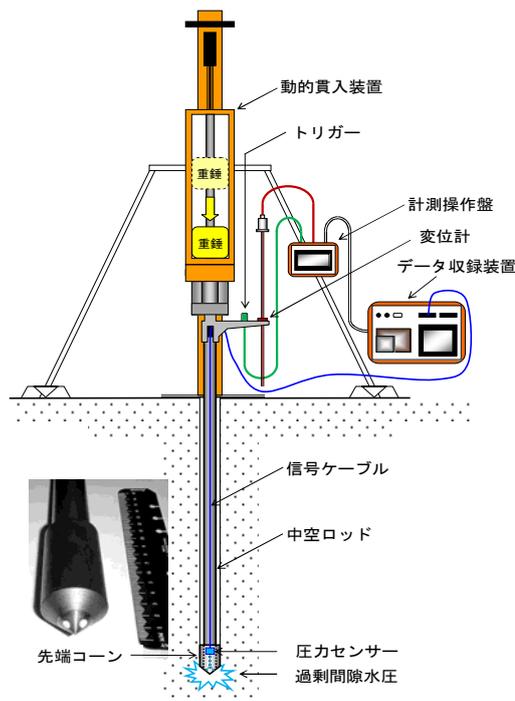


図-1 PDC試験装置の概要図



写真-1 PDCのMRSへの装着状況

3. 地盤特性の評価法

(1) 地盤の貫入抵抗 (N_d 値 : 換算 N 値)

MRSは、20cm貫入に要する打撃回数 (N_{dm} 値) がSRSの2倍となるように設計されている。また、SRSは20cm貫入に要する打撃回数 (N_{dm} 値) が標準貫入試験の N 値と等しくなるように設計されている。MRSおよびSRSでは、 N_{dm} 値からロッドの周面摩擦の影響を式(1)と式(2)で補正し、地盤の貫入抵抗 N_d 値 (換算 N 値) を求める。なお、PDCでは1打撃毎に、貫入量 d を20cm貫入に要する打撃回数 (N_{dm} 値) に換算し、 N_d 値を算出している。

$$\text{MRS} : N_d = (1/2) \cdot N_{dm} - 0.16M_r \quad \text{式(1)}$$

$$\text{SRS} : N_d = N_{dm} - 0.04M_r \quad \text{式(2)}$$

N_d : 地盤の貫入抵抗 N_d 値 (換算 N 値)

N_{dm} : 20cm貫入に要する打撃回数 (計測値)

M_r : ロッドの回転トルク ($N \cdot m$)

(2) 細粒分含有率 (F_c)

打撃貫入時に発生する過剰間隙水圧の消散は、地盤の透水性に依存する。細粒分含有率の異なる土で測定された過剰間隙水圧 Δu の時刻歴波形の一例を図-2に示す。細粒分が多い土ほど、過剰間隙水圧 Δu の消散が悪く、水圧が残留することが分かる。連続的な打撃で累積される残留間隙水圧 u_R を有効上載圧 σ_v' で除した累積間隙水圧比 u_R/σ_v' と、室内土質試験 (粒度試験) による細粒分含有率 F_c の

関係図を図-3に示す。両者の相関性は良く、式(3)で近似することができる。PDCでは一般に、式(3)を用いて累積間隙水圧比 u_R/σ_v' から細粒分含有率 F_c を推定する。

$$F_c = 18 \cdot u_R / \sigma_v' \quad \text{式(3)}$$

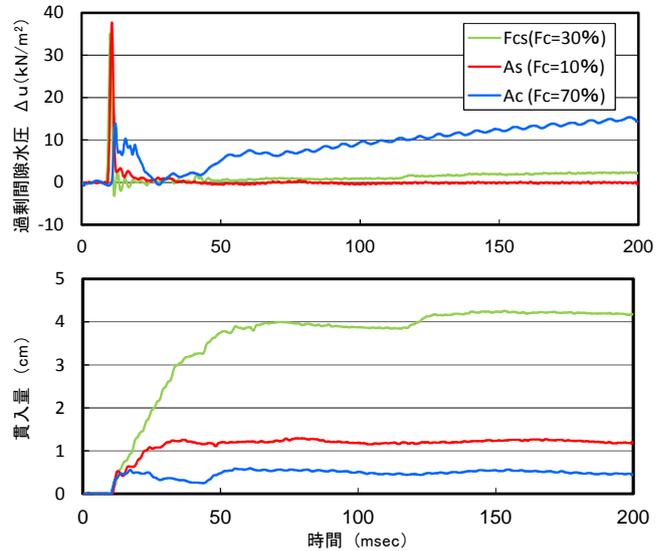


図-2 過剰間隙水圧と貫入量の時刻歴波形記録例

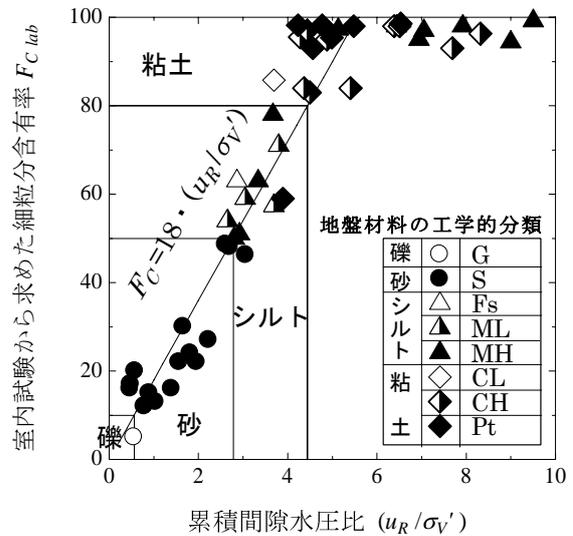


図-3 累積間隙水圧比と細粒分含有率の関係

(3) 地下水位

PDCでは、累積される残留間隙水圧 u_R の深度分布から地下水位を推定する。累積される残留間隙水圧 u_R は、地下水位で浅ではゼロから負の値を示し、地下水位で深では正の値を示す。累積間隙水圧 u_R が正に転ずる深度を地下水位と推定する。

その他、調査後のロッド貫入孔を利用して水位計による地下水位の確認も行う。

4. 液状化判定 (F_L 値)

PDCによる液状化判定の手順を図-4に示す。まず、単位体積重量 γ_t を仮定し全上載圧 σ_v を求める。次に、累積間隙水圧 u_R が負から正に転じる深度を地下水位 GWL と推定し、有効上載圧 σ'_v を求める。次いで、累積間隙水圧比 u_R/σ'_v を算出し、土質分類と細粒分含有率 F_c を推定する。得られた土質分類と最初に仮定した単位体積重量 γ_t の関係が相応しくない場合は、単位体積重量 γ_t を変更し、再度一連の作業を行う。一方で、計測される打撃貫入量から標準貫入試験に相当する換算N値 (N_d 値) を算出する。単位体積重量 γ_t 、細粒分含有率 F_c 、換算N値 (N_d 値) から、各種構造物の設計基準・指針等に示された方法により液状化強度 R_L や液状化抵抗率 F_L 値を求めることができる。

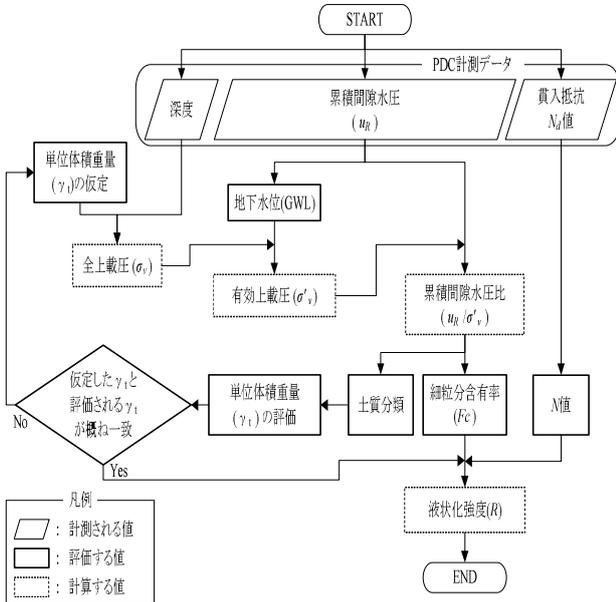


図-4 PDCによる液状化判定の手順

5. PDC と従来法との比較

PDCによる換算N値 (N_d 値) および細粒分含有率 F_c と、従来の標準貫入試験 N_{SPT} および室内土質試験結果 $F_{c,lab}$ を比較した例を図-5に示す。併せて、PDCによる液状化強度 R_{DPTU} の評価結果と、従来の手順で評価した液状化強度 R_{SPT} も示した。図中の液状化抵抗率 F_L は、道路橋示方書・同解説(平成14年)に準拠して算出したものであり、レベル2地震動のタイプI(プレート境界型の大規模地震動)について求めたものである。PDCを用いた評価結果は、従来法と良く一致している。また、PDCでは1打撃毎に結果が得られるため、空間的分解能が高く、深度方向の地盤の不均一性を詳細に把握することができる。

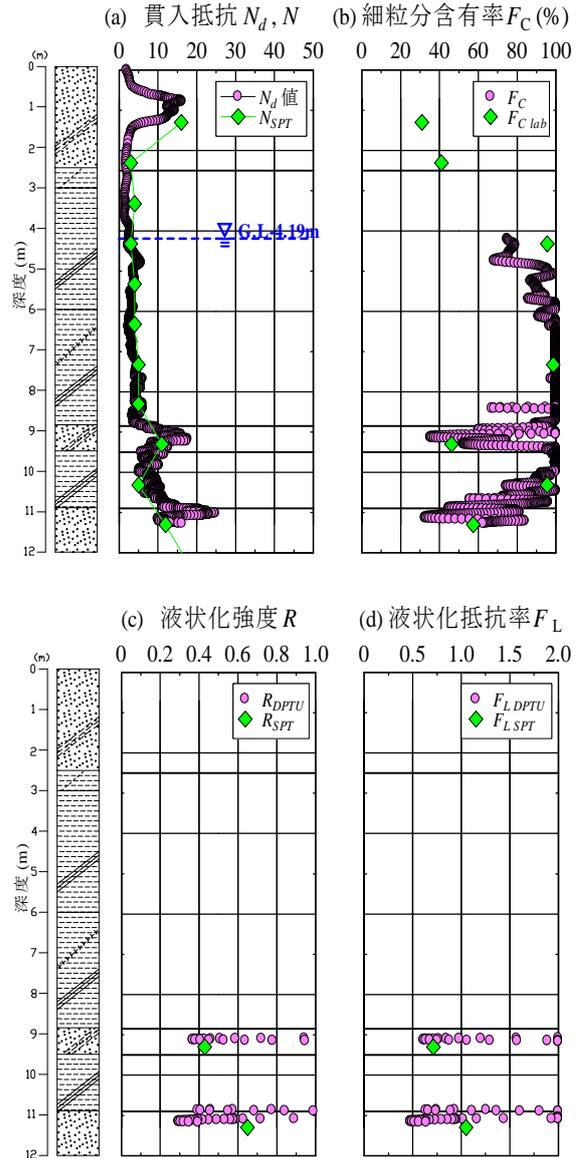


図-5 PDC と従来法との比較例

6. 河川堤防の耐震点検(三次点検)での適用事例 ～静的変形解析の精度向上～

レベル2地震動に対する河川堤防の耐震点検マニュアル(案)¹⁾が平成22年11月に通達され、レベル2地震動に対する河川堤防の耐震点検が始まっている。このマニュアル(案)では、耐震点検方法を3段階に階層化し、一次、二次、三次点検と規定している。

一次点検では、堤防高さを照査要因とし二次点検区間が抽出される。

二次点検では、基礎地盤の土質構成、堤防構造、背後地の土地利用等を踏まえ、堤防の土層縦断面図から照査区間を細分化する。また、二次点検では、液状化の可能性のある層厚に着目する。二次点検において

PDC を活用することで、堤防縦断方向の地盤情報を迅速かつ効率的に把握することが有効である。

三次点検では、二次点検でさらに照査が必要とされた細分区間内で代表断面を設定し、堤防横断方向の土層断面をモデル化して地震後の堤防天端の変形量を解析する。

指針(案)²⁾で推奨される地震時変形解析は精緻な有限要素法による静的変形解析「ALID」であり、2次元の地盤モデルを作成する必要がある。しかし、堤防横断方向で複数のボーリングを実施して地層構成を把握することは少なく、高度な解析手法を用いても妥当な結果を得ることが出来ないことが懸念される。

液状化に伴う堤体および基礎地盤の流動を解析する場合には、液状化層の分布は勿論、堤防横断方向の土層の連続性や傾斜を把握することが重要である。

A 川での地質調査で得られた土層横断面図を図-6に示す。図中の(a)は1箇所のボーリング調査結果により作成した土層断面図、(b)は PDC を追加実施して作成した断面図である。PDC を実施したことにより、堤内側から堤外側への地層の傾斜を確認することができた。また、砂質土層(A_{S2}層)が堤内側で消失すること、堤外側に粘性土層(F₃層)が分布することが明らかとなった。

図-7は、図-6の土層断面をもとに実施したALIDの解析結果である。堤防天端1箇所のみの調査結果(a)を用いた場合は液状化層が堤内側と堤外側の両方向に伸びるように変形している。一方、(b)のケースでは、液状化層が堤内側から堤外側の1方向へ流動する結果となっている。変形量に関しても、(a)と(b)で差が見られた。水平変位・鉛直変位ともに(b)に比べて(a)の方が小さく、危険側の評価となっている。

本事例は、PDC を用いることにより、変形解析の精度向上に努めた例である。土層横断面図の精度を上げる事の重要性が確認でき、PDC の有効性が検証されたと考える。

7. おわりに

PDC は、原位置で地盤の動的貫入強度(N_d値)と同時に細粒分含有率Fcを評価することが可能である。このことにより従来、調査ボーリングと室内土質試験結果で算定していた液状化判定が、短時間に低コストで行えるようになった。

また、河川堤防における調査・解析精度の向上に対して有益であることは勿論、道路盛土のように縦断方向に長く連続した構造物や大規模な埋立地等を対象とした地盤調査においても有効な手法と考える。

今後も PDC の有益な活用を模索し、より質の高い地盤情報を提供していきたい。

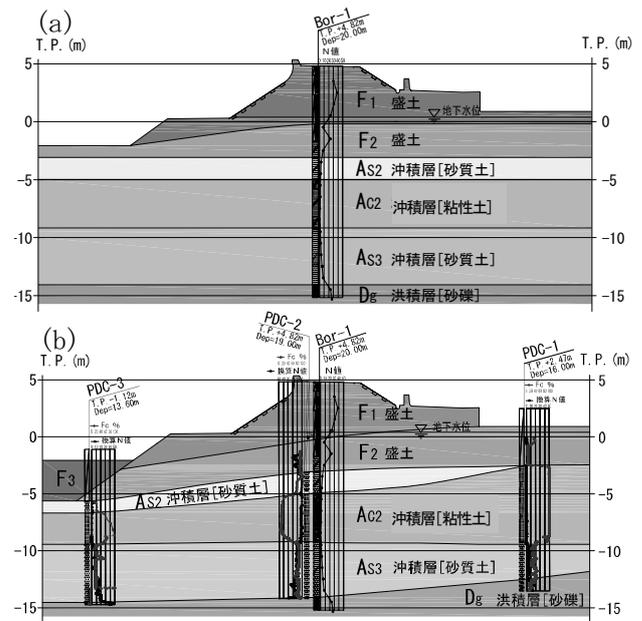


図-6 A 河川河口部の想定土層横断面図

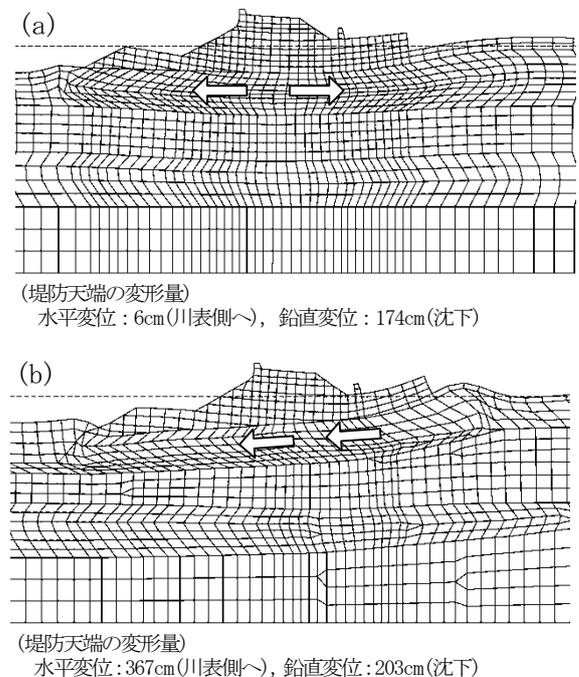


図-7 液状化による地盤の剛性低下を考慮した静的地盤変形解析結果(地震後の地盤変形図)

参考文献

- 1) 国土交通省水管理・国土保全局治水課(2010)：レベル2地震動に対する河川堤防の耐震点検マニュアル(案)・同解説
- 2) 国土交通省水管理・国土保全局治水課(2007)：河川構造物の耐震性能照査指針(案)・同解説
- 3) 澤田俊一, 吉澤大造, 藤井紀之, 植村一瑛, 伊藤亮太, 古田一郎(2012)：ピエゾドライブコーン(液状化ポテンシャルサウンディング)の適用事例—レベル2地震動に対する河川堤防の耐震点検—, 応用地質技術年報 No. 31, 67-73.