

# 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） — 性能設計に向けた原位置試験 —

澤田 俊一\*

Piezo Drive Cone (The sounding evaluation equipment for strength of soil  
liquefaction)

Shun-ichi Sawada\*

## Abstract

It is clear that the evaluation of strength of soils against liquefaction is increasingly important to forecast the damage of structures under the earthquake.  $N$  value in the standard penetration test (SPT) and the grain size distribution test are both necessary to estimate the liquefaction susceptibility. These investigations take long response time in laboratory and cost very much. Moreover, it could be difficult to reach the exact data under a wide area of un-uniformed ground conditions in spite of estimating liquefaction susceptibility from the limited locations.

This technical note will introduce the new method of estimating liquefaction susceptibility using new developing system of dynamic penetrometer with pore pressure transducer which named "Piezo Drive Cone".

The excess pore pressures generated at the tip of cone during dynamic penetration into ground were measured. The maximum excess pore pressure ratios were valid discriminations of the groundwater table. On the other hand, the residual cumulative pore pressure ratios indicate the classification and identification of soils. This method is capable of evaluation for the strength of soils against liquefaction using only in-situ data.

**Keywords :** In-situ test, Liquefaction, Pore pressure, Cone penetration test

## (要 旨)

地震時の被害を予測する場合に地盤の液状化強度を求める必要がありますが、従来は原位置での調査ボーリングによる標準貫入試験から得られる $N$ 値とともに、粒度特性を求めるために室内土質試験を実施する必要があります。この時間と費用が耐震設計におけるボトルネックとなっています。また、従来の方法では空間的な分解能向上に限界があり、性能設計における地盤の不均質性や不確実性の評価も困難となっています。

ここで紹介する ピエゾドライブコーン（通称：液状化ポテンシャルサウンディング）は、打撃貫入時の地盤に発生する間隙水圧を測定することにより、地盤の貫入抵抗値 $N$ 値の評価のみならず液状化判定に必要とされる地下水位、土質区分（細粒分含有率 $F_c$ ）の推定を行い原位置で液状化強度を求めることができます。原位置試験のみで短時間に高い空間的分解能を有した地盤の液状化強度が得られると言う特徴を活かし、現在各種土木・建築構造物に導入が進んでいる性能設計に向けた新しい調査法です。

**キーワード：** 原位置試験, 液状化, 間隙水圧, コーン貫入試験

\* 応用地質(株)エンジニアリング本部

\* OYO Corporation

## 1. まえがき

地震時の被害を予測する上で重要となる地盤の強度に液状化強度があります。各種土木・建築構造物の設計基準・指針等では、この液状化強度を求める簡易法として調査ボーリングにおける標準貫入試験で得られる  $N$  値と掘進時に確認される地下水位、さらには調査ボーリングによって得られる攪乱試料を用いた室内土質試験による粒度試験結果から液状化強度を求めるのが標準的です。

このことから、原位置でのボーリングの調査結果、さらには室内土質試験の結果を待って液状化判定を行うこととなり時間が掛かっていました。

この“技術ノート”で紹介するピエゾドライブコーン (Piezo Drive Cone 以下“PDC”と表記します。) は、原位置試験のみで地盤の液状化強度が算定できるサウンディング装置です。

## 2. 試験法の概要と適用範囲

### 2.1 試験の概要

PDC は地盤の動的貫入抵抗を計測するとともに、動的貫入時に先端コーン周辺地盤で生じる過剰間隙水圧を計測することにより、計測地点の地下水位と計測深度ごとの土質区分を推定して、簡易に地盤の液状化強度を評価する原位置試験です。

PDC の構造概要を図-1 に示します。試験では打撃

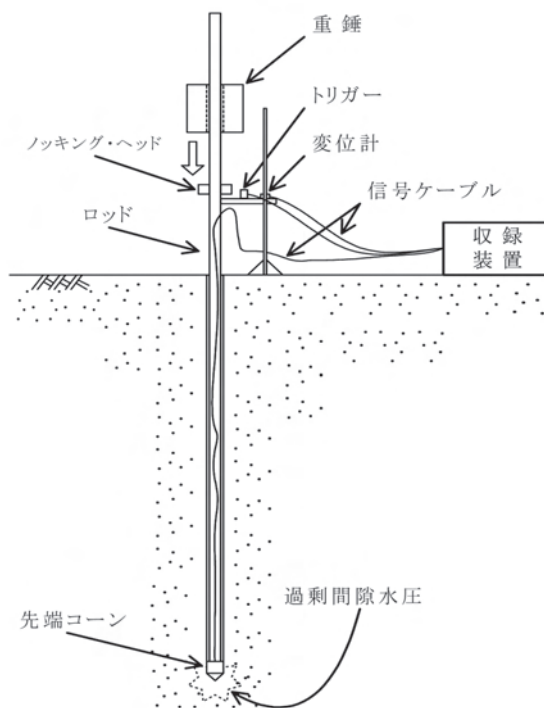


図-1 Piezo Drive Cone の構成概要

Fig.1 Schematic illustration of the Piezo Drive Cone

貫入時に先端コーン周辺地盤に発生する間隙水圧応答を計測します。この試験結果からは、調査地点の地下水位  $GWL$ 、地盤の深度毎の  $N$  値と細粒分含有率  $F_c$  を求めることができ、土木・建築構造物の設計指針・基準等を用いて設計を行う場合の地盤の液状化判定をサウンディングのみで行うことができる特徴を有しています。

### 2.2 適用範囲

試験の適用範囲は打撃貫入試験装置の性能によって異なります。現在では、軽量型動的貫入試験 (ミニラム) とスウェーデン式ラムサウンディング (SRS) の2種類の打撃貫入装置に装着する仕様があります。調査深度は 20 m 程度以浅で対象地盤は標準貫入試験で得られる  $N$  値が 50 程度までの打撃貫入が可能な地盤に適用できます。

## 3. 試験装置

PDC は以下の装置から構成されます。

- ① 先端コーン：打撃貫入時に計測する間隙水圧計が装着されている先端コーン
- ② 動的貫入装置：動的貫入を行うための重錘落下装置 (後節で紹介する計測事例では軽量型動的貫入装置 (ミニラム) を採用)
- ③ 変位計：打撃貫入するロッド頂部の貫入量を高速で計測する磁歪リニア変位計
- ④ トリガー：打撃のタイミングを検知する装置
- ⑤ データロガー：高速サンプリング・大容量記憶が可能なデータ収録装置

データロガーで収録されるデータは、間隙水圧計の

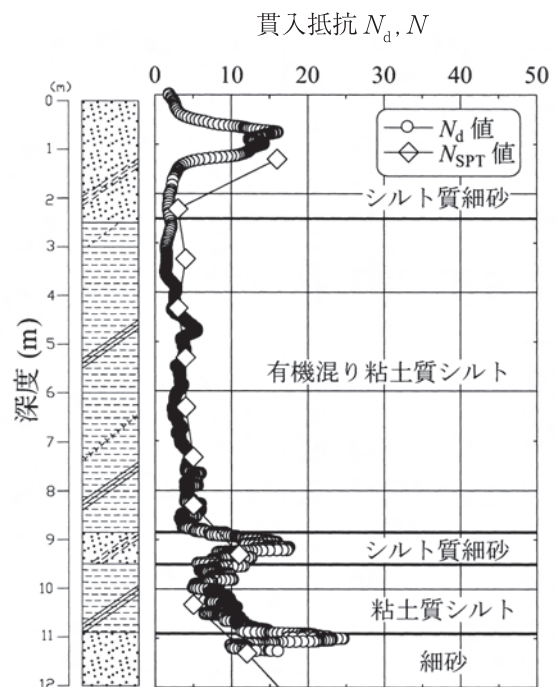


図-2  $N$  値,  $N_d$  値の深度分布例

Fig.2 Profile of penetration resistances at a site of study

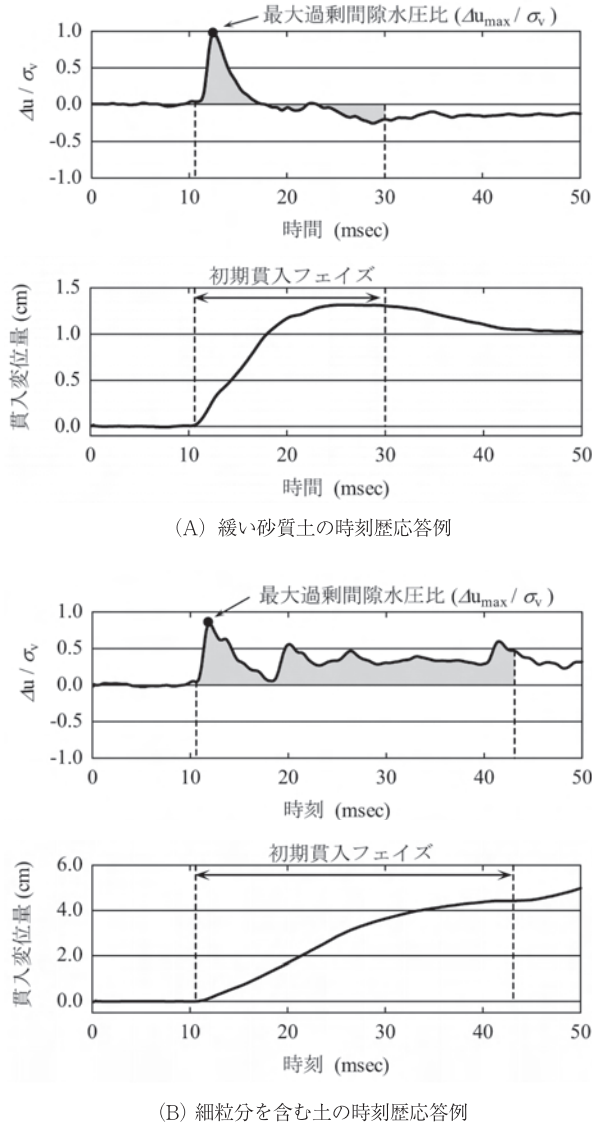


図-3 時刻歴応答例  
Fig3 Schematic illustration of pore pressure change during cone penetration

印可電圧と応答電圧，地表面位置での磁歪リニア変位センサーの応答電圧です。打撃貫入時の動的な間隙水圧応答値は，プレトリガーにより自動的に電気信号として中空のロッドを通した信号ケーブルを伝わり，地上のデータロガーでA/D変換され記録されます。

4. 地盤定数の評価方法

4.1 動的貫入強度 (換算  $N_d$  値:  $N_d$  値) の評価

図-2には，調査ボーリング近傍で実施した地点でのミニラムの  $N_m$  値を，1打撃ごとにSPTで得られる  $N$  値に換算した  $N_d$  値 ( $N_d=1/2N_m$ ) の深度分布を示しています。同図には，調査ボーリングで実施したSPTから得られる  $N$  値も重ねて示しています。 $N_d$  値は  $N$  値と一致する部分も見られますが，1mピッチで実施するSPTでは見えなかった薄層の存在や互層状況が  $N_d$  値の分布からは良く観察でき，PDCを用いた計測での深さ方向の分解能の高さがわかります。

4.2 地下水位 (GWL) の評価

打撃時には重錘がノッキング・ヘッドを打撃するタイミングでトリガーがかかり，打撃直後の貫入変位量および間隙水圧量を高速 ( $\Delta t=100 \mu sec$ ) でデータ収録します。図-3に計測された時刻歴応答例を示します。この計測記録から，1打撃毎に打撃直後 (正確には重錘がノッキング・ヘッドを打撃してからリバウンドもしくは再打撃するまでの貫入量が増大している時間領域 (以降「初期貫入フェイズ」と呼んでいます。)) の最大過剰間隙水圧比 ( $\Delta u_{umax}/\sigma_v$ ) を求めます。この  $\Delta u_{umax}/\sigma_v$  の深度分布を図-4に示します。ここでの全上載荷重 ( $\sigma_v$ ) は次節で推定する土質区分により設定しています。同図の  $\Delta u_{umax}/\sigma_v$  は地表面付近の浅い地盤では大きな値を示しているのに対し，ある深度以深で急激に減少してゼロ付近に収束しています。このゼロ付近で収束する深度に着目すると，調査ボーリングで確認された地下水位 (図中に地下水位記号で示した深度) と良く一致することがわかります。図-5には，これまでに調査ボーリングで計測された地下水位とPDCで推定した地下水位の関係を示します。同図の相関は良いことがわかります。

4.3 土質区分 (細粒分含有率:  $F_c$ ) の評価

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係数 ( $k$ ) に依存し，細粒分の多い地盤では少ない地盤に比べて貫入完了時点で累積する間隙水圧 ( $u_R$ ) が大きくなることが推測できます。図-3には，(a) 緩い砂質土と (b) 細粒分を含む土での計測波形記録を示しています。(b) の細粒分を含む土での貫入完了時点での累積間隙水圧比 ( $u_R/\sigma_v'$ ) は，砂質土に比べ累

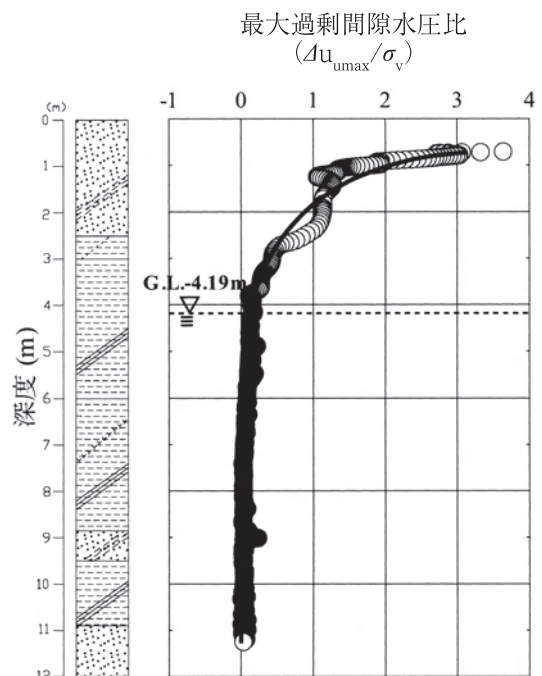


図-4 最大過剰間隙水圧比の深度分布例  
Fig4 Profile of maximum excess pore pressure ratio

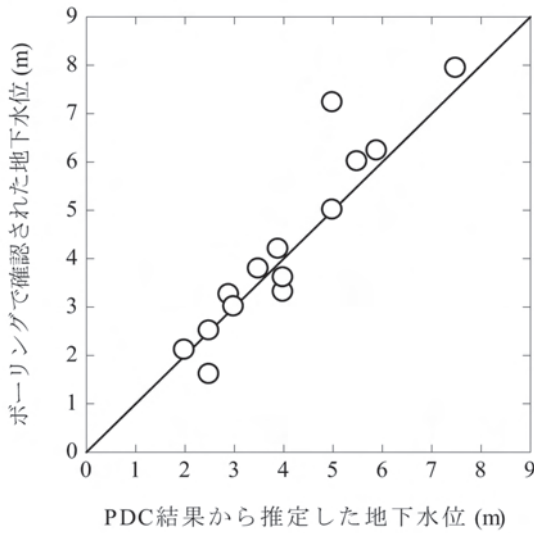


図-5 地下水位の計測値と推定値  
Fig5 Comparison between measured and evaluated GWL from PDC

積したままになっています。ここでの各深度の有効上載圧 ( $\sigma'_v$ ) は、前項の推定した  $GWL$  を用いて計算しています。図-6には、 $u_R/\sigma'_v$  と SPT で採取した試料を用いた室内土質試験 (土の粒度試験) から得られた細粒分含有率 ( $F_{c_{lab}}$ ) の関係を示しています。 $u_R/\sigma'_v$  と  $F_{c_{lab}}$  の関係は相関が良く、 $F_{c_{lab}}$  が 100%未満では、(1) 式の関係が認められます。

$$F_{c_{lab}} = 18 \cdot (u_R/\sigma'_v) \quad (1)$$

図-7には、(1) 式を用いて土質区分境界を明示した  $u_R/\sigma'_v$  の深度分布を示します。併記した調査ボーリング

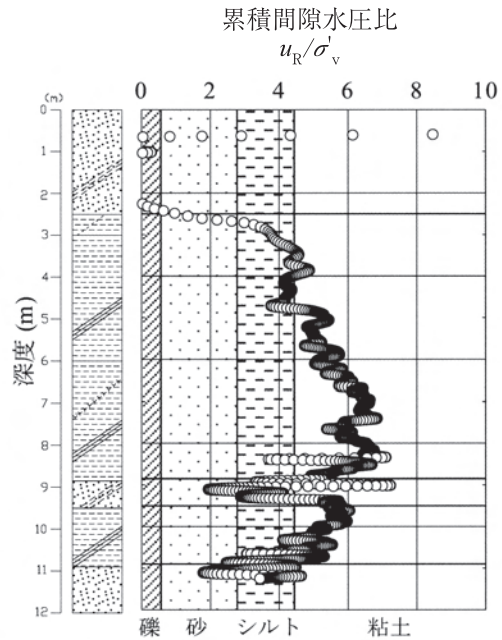


図-7 累積間隙水圧比の深度分布例  
Fig7 Profile of soil types determined by residual pore pressure record

の柱状図に示された土質区分と累積間隙水圧比から推定される土質区分との相関が良いことがわかります。

#### 4.4 液状化強度 (R) の評価

PDC を用いた液状化強度の評価の流れを図-8 に示します。流れに示すとおり、液状化強度 (R) の評価には最初に単位体積重量 ( $\gamma_p$ ) の仮定を行う必要があります。しかし、土質区分としての細粒分含有率  $F_c$  が結果として評価できるため、1 から 2 回程度の繰返し

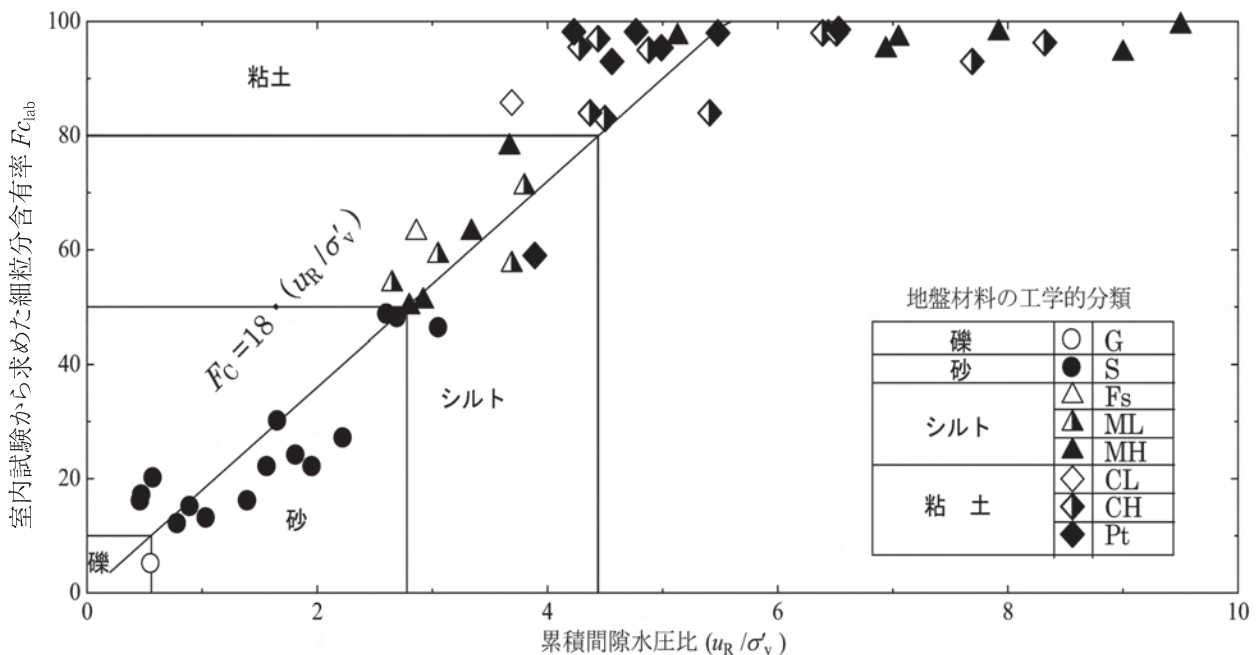


図-6 累積間隙水圧比 ( $u_R/\sigma'_v$ ) と細粒分含有率  $F_c$  の関係  
Fig6 Determination of fines content on the basis of pore pressure record

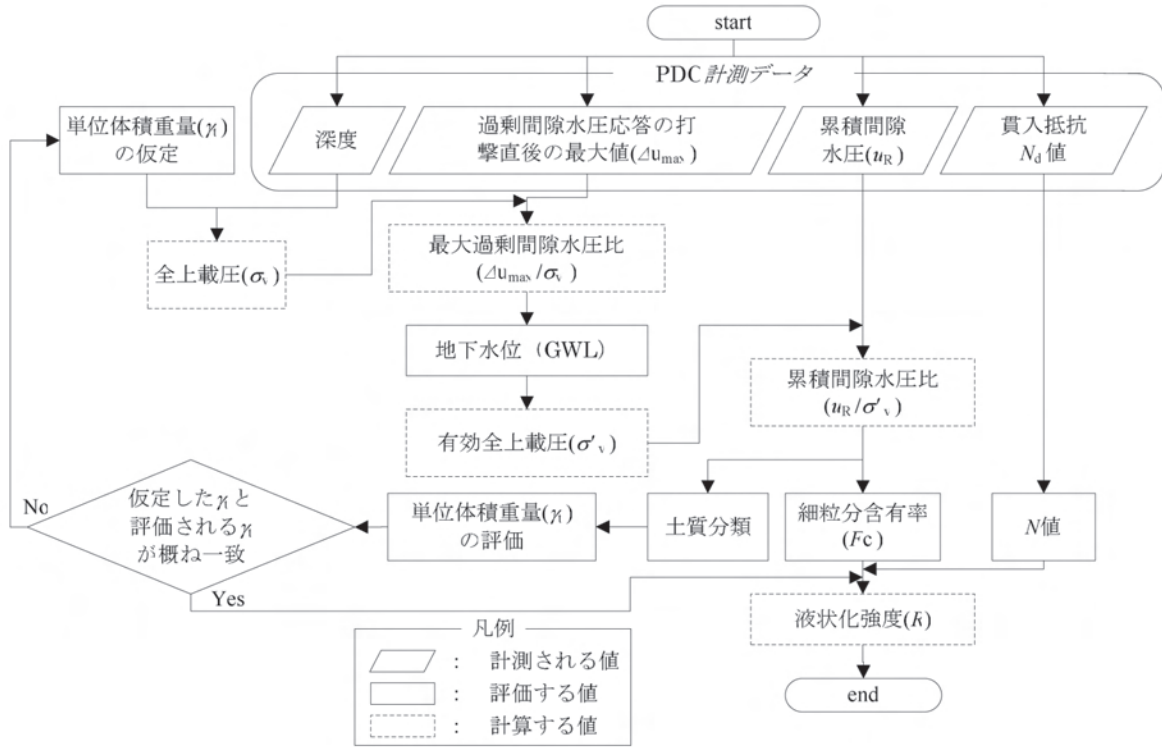


図-8 液状化強度の評価の流れ  
Fig.8 Assessment of Liquefaction probability from PDC data

計算で収束可能となります。

PDCより得られる $\gamma$ 、 $GWL$ 、 $F_c$ 、 $N$ 値が求めれば各種構造物の設計指針・基準等に示された液状化強度の算出が可能となります。図-9には、PDCによる液状化強度( $R_{PDC}$ )の評価と従来のSPTの $N$ 値および室内土質試験結果から得られた粒度特性により評価した液状化強度( $R_{SPT}$ )を比較して示します。同図には、道路橋示方書(2002年度版)に準拠して算出した液状

化抵抗率( $F_L$ )も示しています。 $F_L$ 値はレベル2地震動のタイプI(プレート境界型の大規模な地震を想定したタイプであり、加速度振幅は大きくないが継続時間が長い想定地震)について求めたものです。PDCを用いた液状化強度は従来法とも良く一致しており、これまでのSPTによる判定では評価できなかった細かい液状化強度 $R$ 、 $F_L$ の深度分布が得られることがわかります。

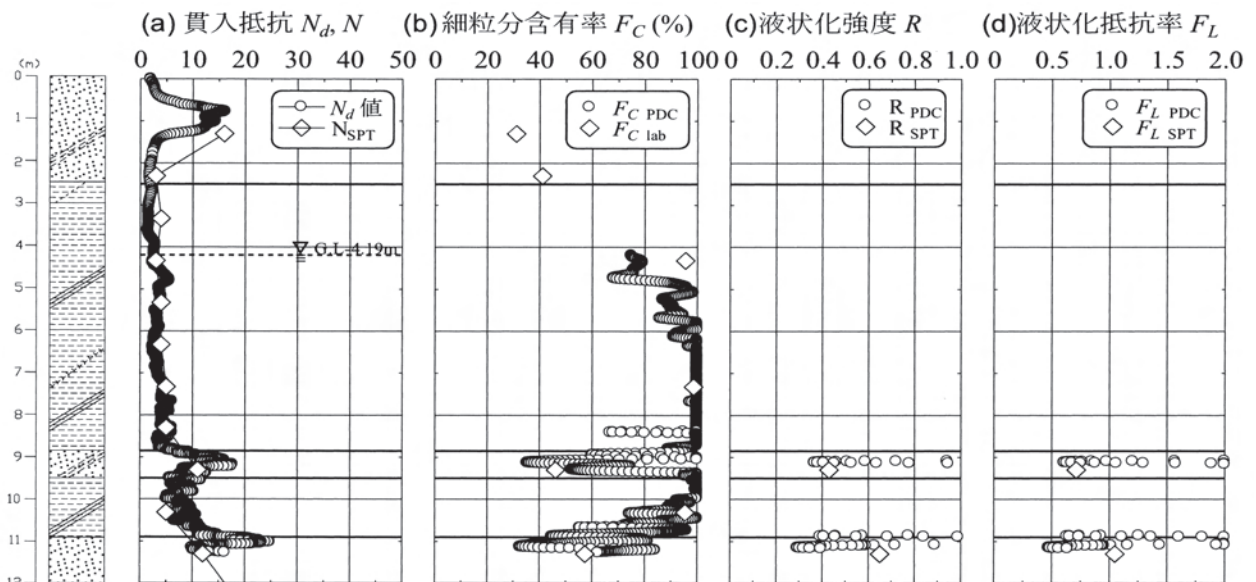


図-9 液状化強度・液状化判定例  
Fig.9 Example of assessed liquefaction risk

## 5. あとがき

Piezo Drive Cone (PDC) では、従来のサウンディングでは困難であった地下水位の把握、さらには土質判別が可能となります。

このことにより従来、調査ボーリングによって試料を採取し室内土質試験結果を得た後にしか実施できなかった液状化判定が、原位置試験のみで短時間に行える新しい調査技術を紹介しました。

サウンディングは、原位置で簡易に短時間で地盤パラメータが得られることが最大の特徴となっています。性能設計を行うにあたり地盤の不均質性を適切に評価するために空間的分解能の高い調査を効率的に行うことが重要となっており、そのためにはPDCを始めとするサウンディング技術は不可欠です。PDCが有効活用できる場が広がり、性能設計時代の新しい地盤調査法として展開していくことを切に望んでいます。

## 参 考 文 献

- 1) Sawada, S.(2004) : Estimation of liquefaction potential using dynamic penetration with pore pressure transducer, *International Conference on Cyclic Behavior of Soils and Liquefaction Phenomena*, Bochum, 05-312.
- 2) 澤田俊一, 塚本良道, 石原研而(2004) : 間隙水圧測定を伴う動的貫入試験法-その1 試験方法・装置-, 第39回地盤工学研究発表会, 新潟, 1927-1928.
- 3) 澤田俊一, 塚本良道, 石原研而(2004) : 間隙水圧測定を伴う動的貫入試験法-その2 室内土層実験-, 土木学会第59回年次学術講演会, 愛知, 815-816.
- 4) 澤田俊一, 塚本良道, 石原研而(2004) : 間隙水圧測定を伴う動的貫入試験法-その3 原位置実験-, 第49回地盤工学シンポジウム, 東京, 12-20.
- 5) 澤田俊一, 塚本良道, 石原研而(2005) : 間隙水圧測定を伴う動的貫入試験法-その4 土質分類-, 第40回地盤工学研究発表会, 函館, 2235-2236.
- 6) 澤田俊一, 塚本良道, 石原研而(2005) : 間隙水圧測定を伴う動的貫入試験法-その5 地下水位-, 土木学会第60回年次学術講演会, 愛知, 961-962.
- 7) 澤田俊一, 塚本良道, 石原研而(2005) : 間隙水圧測定を伴う動的貫入試験法-その6 液状化強度-, 第50回地盤工学シンポジウム, 東京, 1-6.
- 8) 澤田俊一(2006) : 間隙水圧測定を伴う動的貫入試験法-その7 間隙水圧の測定位置-, 第41回地盤工学研究発表会, 鹿児島, 153-154.
- 9) 澤田俊一(2006) : 間隙水圧測定を伴う動的貫入試験法-その8 先端荷重-, 土木学会第61回年次学術講演会, 滋賀, 675-676.
- 10) 澤田俊一(2007) : 間隙水圧測定を伴う動的貫入試験法-その9 液状化後の沈下量-, 土木学会第62回年次学術講演会, 広島, 451-452.
- 11) Sawada, S. (2007) : Evaluation of strength of soils against liquefaction using piezo drive cone, *4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, Thessaloniki, Greece, Paper ID=1146.
- 12) 澤田俊一, 吉澤大造, 比留間誠之, 長瀬雅美, 菅野高弘, 中澤博志(2008) : 間隙水圧測定を伴う動的貫入試験法-その10 不同沈下評価-, 第43回地盤工学研究発表会, 広島, 187-188.
- 13) 澤田俊一(2009) : 間隙水圧測定を伴う動的貫入試験法-その11 空間的分解能の向上-, 土木学会第64回年次学術講演会, 福岡, 451-452.
- 14) Sawada, S. (2009) : Evaluation of differential settlement following liquefaction using Piezo Drive Cone, *17th International Conference on Geotechnical Engineering*, Alexandria, Egypt, 1064-1067.
- 15) 澤田俊一, 菅野高弘, 中澤博志, 竹村淳一(2010) : 間隙水圧測定を伴う動的貫入試験法-その12 滑走路下の液状化対策評価事例-, 土木学会第65回年次学術講演会, 札幌, 327-328.