

浦安市における各種動的サウンディング試験の比較（その6：PDC）

現場調査，液状化，動的コーン貫入試験	応用地質株式会社	エンジニアリング本部	国際会員	○吉澤 大造
	〃	計測システム事業部	正会員	伊藤 義行
	〃	エンジニアリング本部	国際会員	藤井 紀之
	〃	〃	国際会員	澤田 俊一

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震によって浦安市で大きな液状化被害が生じた。その原因を探るために、浦安市高洲8丁目地盤調査の一斉試験を行った。行った調査は、動的サウンディング試験（標準貫入試験，各種動的コーン貫入試験）と静的サウンディング試験（各種電気式コーン貫入試験，スウェーデン式サウンディング試験とその改良試験，表面波探査）である。一斉試験は液状化した敷地内で調査を行い，各試験の結果を比較して，その相関性を見いだすことも本調査の目的としている。ここでは，Piezo Drive Cone（以降“PDC”と表記する。）の調査結果とSPTおよび物理試験と比較結果，PDCによる液状化判定結果を報告する。

2. PDCの概要

PDCは，動的貫入試験機を用いて地盤の貫入抵抗 N_d 値（換算 N 値）を計測すると共に，動的貫入時に先端コーン周辺地盤で発生する過剰間隙水圧応答を計測する新しい地盤調査法である¹⁾²⁾。地盤の貫入抵抗 N_d 値（換算 N 値）と過剰間隙水圧応答から推定される細粒分含有率 F_c を用いて，土木・建築構造物の設計指針・基準の液状化判定（ F_L 法）を行うことが出来る。

PDCの測定装置は，図-1の概要図に示すとお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³⁾。その他に，スウェーデンオートマチックラムサウンディング試験機（以降“SRS”）にも装着が可能である。今回の一斉試験では，MRSを使用した。

データ収録装置が記録するデータは，圧力センサーの応答電圧と変位計の応答電圧の2成分である。打撃貫入時に先端コーン位置で計測された過剰間隙水圧の応答値は，電気信号として中空ロッドに通した信号ケーブルを伝わり，地上のデータ収録装置でA/D変換され自動収録される。1回の打撃貫入で記録されるデジタルデータは，サンプリング周期100 μ sec（10 kHz），プレトリガー10 msec（100データ/CH）を含む0.2秒間（2,000データ/CH）である。

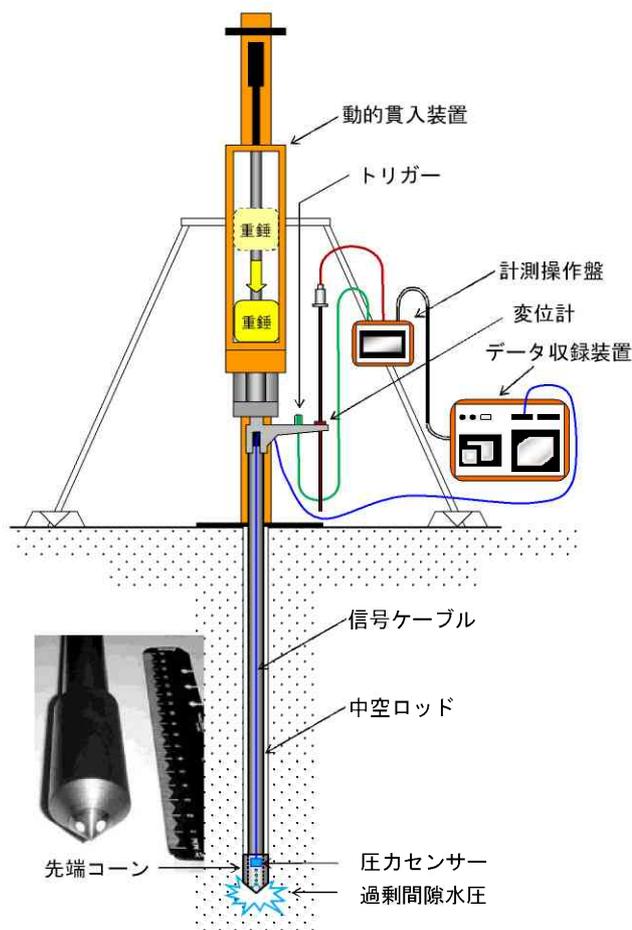


図-1 PDC 試験装置に概要図

3. 地盤定数の評価方法

3.1 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。 N_{dm} 値からロッドの周面摩擦の影響を式(1)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打撃毎の貫入量 d から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。

$$N_d = \frac{1}{2} N_{dm} - 0.16 M_r \quad \text{式(1)}$$

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・m)

3.2 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 (土質) の透水係数 k に依存する。細粒分含有率 F_c の異なる土で測定された1打撃での過剰間隙水圧 Δu と貫入量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。同図より両者の相関性は高く、式(2)で近似式される。PDC では、式(2)を用いて累積間隙水圧比 u_R/σ'_v より細粒分含有率 F_c を推定する。

$$F_c = 18 \cdot u_R / \sigma'_v \quad \text{式(2)}$$

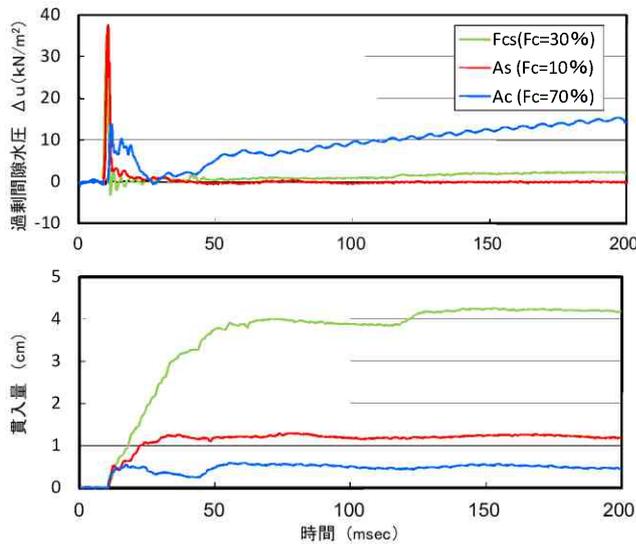


図-2 過剰間隙水圧と貫入量の時刻歴波形記録例

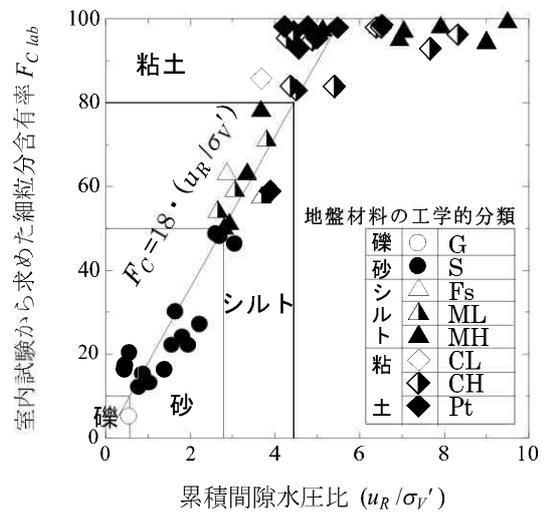


図-3 累積間隙水圧比と細粒分含有率の関係

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 は PDC では得られないことから仮定して全上載圧 σ_v を算出する。次に、累積される間隙水圧 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 を算出する。最後、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。なお、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。

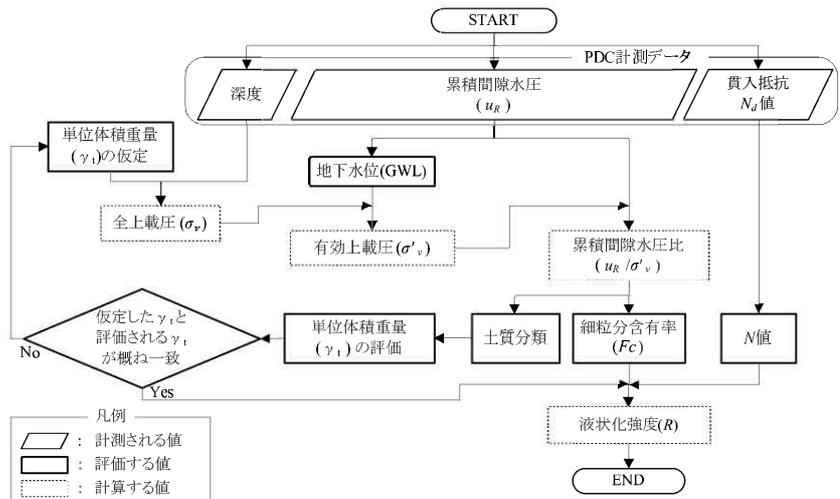


図-4 PDC による液状化判定の手順

一方、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) が算出する。単位体積重量 γ_t 、細粒分含有率 F_c および換算 N 値 (N_d 値) が求めれば、各種構造物の設計指針・基準等に示された方法により液状化強度比 R_L や液状化抵抗率 F_L 値が算出される。

5. 調査結果

PDC は敷地内で 2 地点の調査を行った。地点 1 は敷地の海側に位置し、地点 3 は地点 1 から約 100m 陸側に位置する。調査深度は、液状化の恐れのない沖積粘性土 (Ac 層) を 2m 以上確認とした (深度 18m)。

表-1 には、データ整理に用いた各土層の単位体積重量 γ_t を示す。調査結果として、図-5 に地盤の貫入抵抗 N_d 値 (換算 N 値) と細粒分含有率 F_c の深度分布図を示す。なお、本図には、標準貫入試験の N 値と粒度試験による細粒分含有率 F_c を併記した。また、深度分布図に左側にボーリング柱状図を添付した。

本敷地は、浚渫の埋土 (Fs, Fc) が 5m~7m, その下位に沖積層 (As, Ac) が 13m~11m の層厚で分布する。埋土 (Fs, Fc) の層厚は、陸側 (地点 3) よりも海側 (地点 1) で厚くなった。また、砂質土 (Fs) よりも粘性土 (Fc) が卓越していた。なお、粘性土 (Fc) は海側 (地点 3) では全体的に均質な粘性土から成るが、陸側 (地点 3) では深度 3m~4m で砂分が多くなった (40~70%)。

一方、沖積層上部の砂質土 (As) は、海側 (地点 1) よりも陸側 (地点 3) で厚くなった。沖積砂質土 (As) は、両地点とも N_d 値と細粒分含有率 F_c の深度方向の変化が激しいことが特徴的である。砂質土を主体とし、約 50 cm 間隔で粘性土を 10 cm 以下から最大 30 cm の層厚で挟在する。また、粘性土の深度で N_d 値が減少した。

PDC による N_d 値の深度分布は、標準貫入試験の N 値と調和的な結果が得られた。ただし、詳細に見ると 10m 以深では PDC による N_d 値が標準貫入試験の N 値よりも大きめの傾向が見られる。一方、細粒分含有率 F_c についても粒度試験結果と調和的な結果が得られた。特に、地点 3 においては非常に良い相関性が確認された。

表-1 単位体積重量

地層	土質	記号	単位体積重量 γ_t (kN/m ³)
埋土	砂質土	Fs	18.0
	粘性土	Fc	17.0
沖積層	砂質土	As	18.0
	粘性土	Ac	16.0

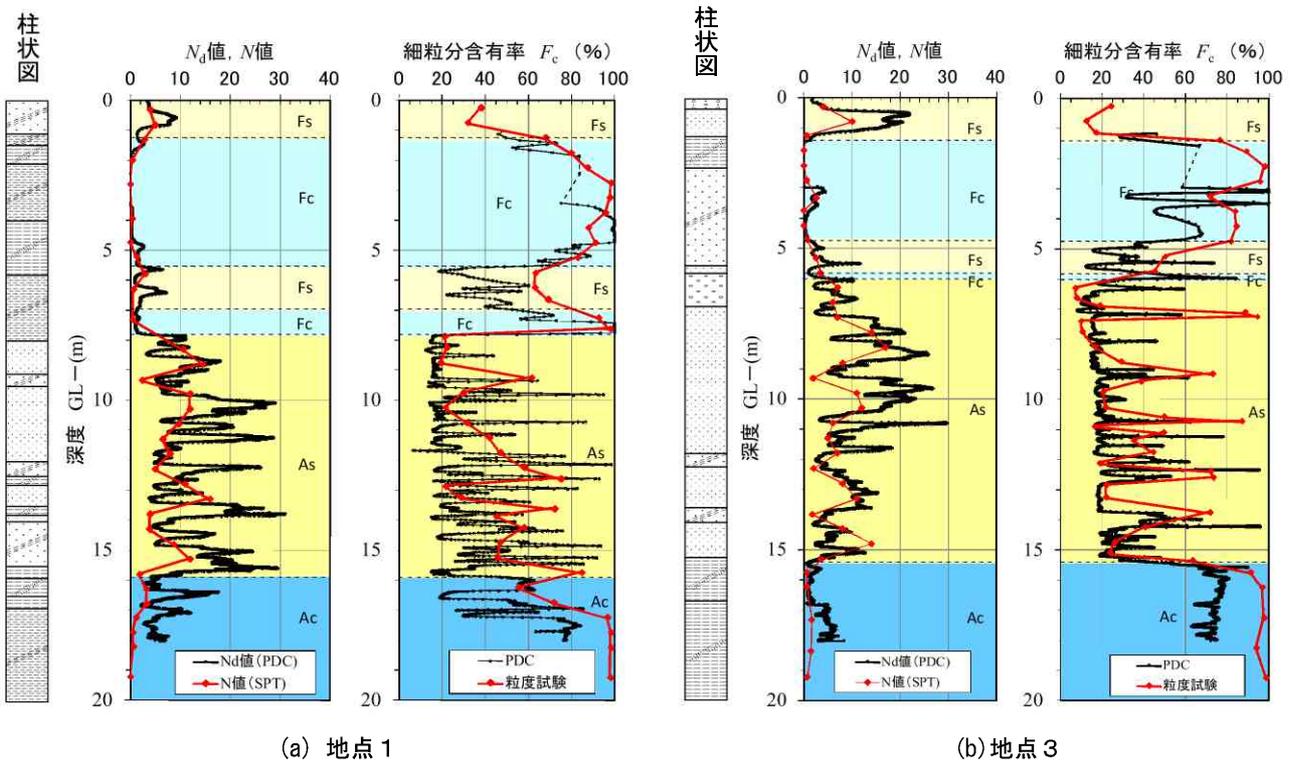


図-5 PDC 調査結果とボーリングおよび粒度試験との比較

6. 液状化判定結果

液状化判定の検討条件を表-2 に示す。液状化判定の方法は、道路橋示方書・同解説 V.耐震設計編⁴⁾を用いた。なお、液状化判定を行う対象層は、PDC では塑性指数 I_p を評価することが出来ないことから、細粒分含有率が 50%未満の土層とした。地表面における水平震度 k_h は、東北地方太平洋沖地震において浦安の K-NET 地震計 (CHB008) で観測された地表面最大加速度 (EW 成分 157ga) より 0.16 と設定した。なお、地震動特性による補正係数 c_w は、タイプ I 地震の 1.0 を用いた。

液状化判定結果として、図-6 に液状化抵抗率 F_L 値の深度分布図を示す。砂質土からなる埋土 (Fs) は、液状化対象層が全体的に液状化する結果となった。一方、沖積砂質土層 (As) は、細粒分含有率 F_c と分布深度により異なる結果となった。目安としては、 N 値 10~17 未満 ($N_a=17\sim 20$ 未満) の土層が液状化する結果となった。

液状化抵抗率 F_L 値は各深度の液状化判定結果であるが、地点全体の液状化の程度を表す指標値として液状化指数 P_L 値がある (表-3)。液状化指数 P_L 値は、海側の地点 1 では 6.38、陸側の地点 3 では 10.1 となり、液状化危険度は共に「液状化の危険度は高い： $5 < P_L$ 値 ≤ 15 」と判定された。

表-2 液状化判定の検討条件

1)適用基準	道路橋示方書・同解説 V .耐震設計編、(社)日本道路協会、H14.3
2)液状化対象層	細粒分含有率 F_c 。50%未満
3)地表面最大加速度	H23.3.11 東北地方太平洋沖地震の観測記録 KNET地震計 CHB008(浦安) 最大加速度 (EW成分 157gal)
4)地震動特性による補正係数 c_w	1.0 (タイプ I 地震)

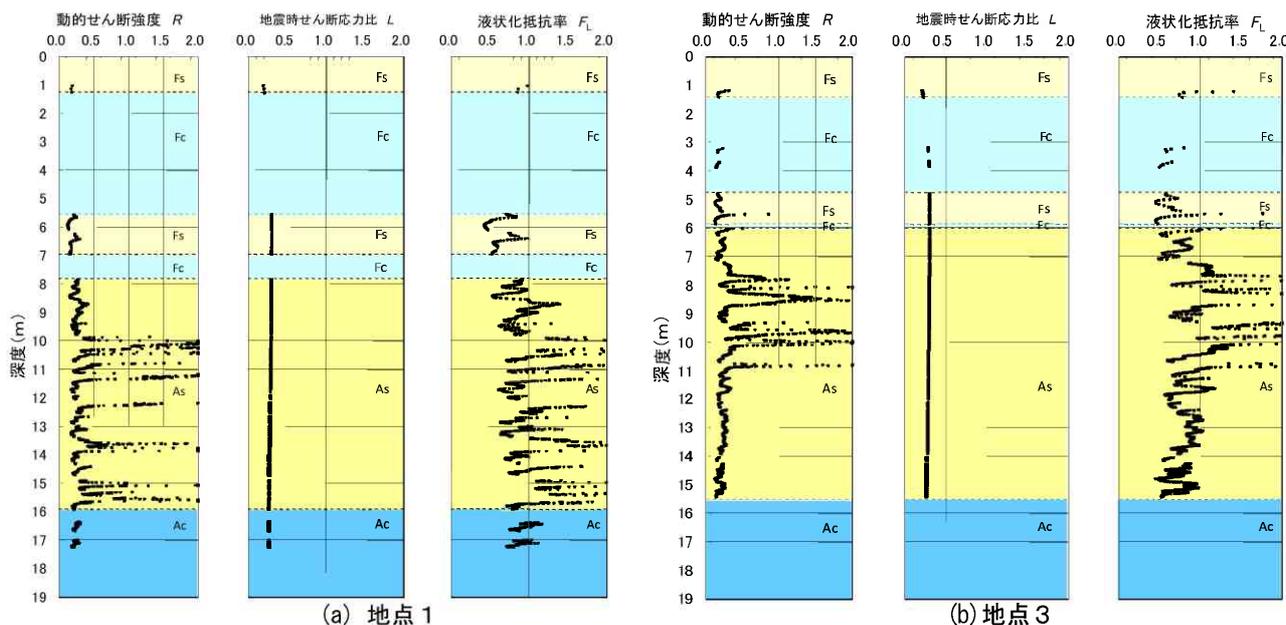


図-6 PDCによる液状化判定結果 (F_L 値分布図)

表-3 液状化の影響を表す P_L 値による判定の区分

P_L 値の区分	判定区分 (レベル1地震)
$0 \leq P_L \leq 5$	液状化による影響は小さい
$5 < P_L \leq 15$	液状化による影響は大きい
$15 < P_L \leq 20$	液状化による影響は非常に大きい

7. まとめ

本報では、東北地方太平洋沖地震で大きな液状化被害が生じた高洲 8 丁目において PDC を実施し、埋土 (Fc, Fs) の土層構成、当地盤の特徴的な沖積砂質土 (As) における細かな粘性土の挟在状況を高い空間的分解能で定量的に評価することができた。また、PDC で推定した細粒分含有率 F_c と粒度試験結果との比較においては、調和的な関係性を確認することができた。一方で、 N_d 値については、深度 10m 以深において N 値より大きめの値を示す結果となった。

液状化被害の評価においては、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行うことが重要であり、そのためにサウンディング調査が不可欠である。PDC は原位置で N 値と細粒分含有率を評価することが可能な液状化評価に特化したサウンディング技術である。今後も更なるデータの蓄積を行うことで、液状化評価の精度向上に努めていきたい。また、 N_d 値についてはトルク補正係数や先端コーン位置における打撃エネルギーの深度依存性等を検討することで、 N 値の推定精度を高めていきたい。

【参考文献】

- 1) Shun-ichi Sawada, Ikuo Towhata: ISSMGE Bulletin: Volume 5, pp15-25, February, 2011
- 2) 澤田俊一, 吉澤大造, 藤井紀之 [2011]. 間隙水圧測定を伴う動的貫入試験法—その 13 地盤情報の相似性—, 第 46 回地盤工学研究発表会, 神戸, pp107-108
- 3) 応用地質株式会社ホームページ: <http://www.oyo.jp/product/11-in-situ/miniram.html>
- 4) (社) 日本道路協会 [2002]. 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, pp120-126