

Piezo Drive Cone を用いた液状化に伴う不同沈下量の評価

(独)港湾空港技術研究所	地盤・構造部	構造振動研究室	菅野 高弘
〃	〃	〃	中澤 博志
応用地質株式会社	東京本社	技術センター	○澤田 俊一
〃	〃	〃	吉澤 大造
〃	〃	東京支店	比留間誠之
〃	〃	ジオテクニカルセンター	長瀬 雅美

1. はじめに

地震時の被害を予測する上で重要となる地盤の液状化強度を直接原位置で簡易に評価する調査装置に *Piezo Drive Cone* (以降“*PDC*”と表記する。) がある^{1) ~10)}。*PDC* は打撃貫入時に先端コーン位置で間隙水圧応答を計測するサウンディング装置である。各種建築・土木構造物の設計指針・基準等を用いて設計を行う場合、地盤の液状化判定に必要となる地盤定数は N 値や地下水位 GWL ⁶⁾、細粒分含有率 F_c ⁵⁾ である。*PDC* はこれらの地盤定数を原位置計測により液状化強度を簡易に短時間で評価⁷⁾できる性能を有している。さらに *PDC* は液状化判定のみではなく液状化に伴う過剰間隙水圧消散に伴う沈下量も評価¹⁰⁾できる試験法である。昭和 39 年 (1964 年) 新潟地震での新潟空港の施設被害に見られる様に、液状化による水平地盤上の土木構造物の被害には地盤の不同沈下が挙げられ、この地震時の液状化に伴う沈下量を推定することは耐震上でも重要なことである。しかし、地盤の不均質性や液状化強度の不確実性から広域に渡って不同となる沈下量を面的に把握することは相当に困難である。広範囲の敷地を有する空港施設において、この不均質で不確実な液状化強度を 3 次元分布として把握するためには空間分解能の高い調査計画が必要となる。このため、より簡易に短時間で液状化強度が評価できる原位置試験が必要となる。本論文は「空港施設における実物大液状化実験」において *PDC* を用いて広域な対象区域の不同沈下を予測し、実験後に測量された実測沈下量との比較結果を報告する。なお、本論文は独立行政法人港湾空港技術研究所地盤・構造部構造振動研究室と応用地質株式会社の共同研究成果を報告するものである。

2. 間隙水圧測定を伴う動的貫入試験の概要

PDC の構造概要を図-1 に示す。*PDC* は、動的貫入試験装置の先端コーン部に打撃貫入時に発生する地盤の過剰間隙水圧を測定する調査方法であり、固有の動的貫入装置に限定されたものではない。本報で用いた貫入試験装置は軽量型ラムサウンディング (ミニラム)¹¹⁾ である。ミニラムの構造図を図-2 に、全景を写真-1 に示す。本装置は重錘落下による動的貫入試験装置の先端コーン部に間隙水圧計が設置され、打撃貫入時の間隙水圧を計測し、データロガーにより収録するシステムである。ミニラムで使用する重錘は重さ 30kg であり、高さ 35cm から自由落下させて先端コーンが地盤内に 20cm 貫入する打撃回数 (N_m 値) を計測する方式である。 N_m 値は標準貫入試験 (以降“*SPT*”と表記する。) で得られる N 値 (N_{SPT}) に換算した換算 N 値 (N_d) と式 (1) の関係がある¹¹⁾。

$$N_{SPT} = N_d = 1/2 N_m \quad (1)$$

収録装置で収録されるデータは、先端コーン部での間隙水圧の印可電圧と応答電圧、磁歪リニア変位センサーの応答電圧の 3 成分である。コーン先端での動的な間隙水圧応答値は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収録装置で A/D 変換され記録される。

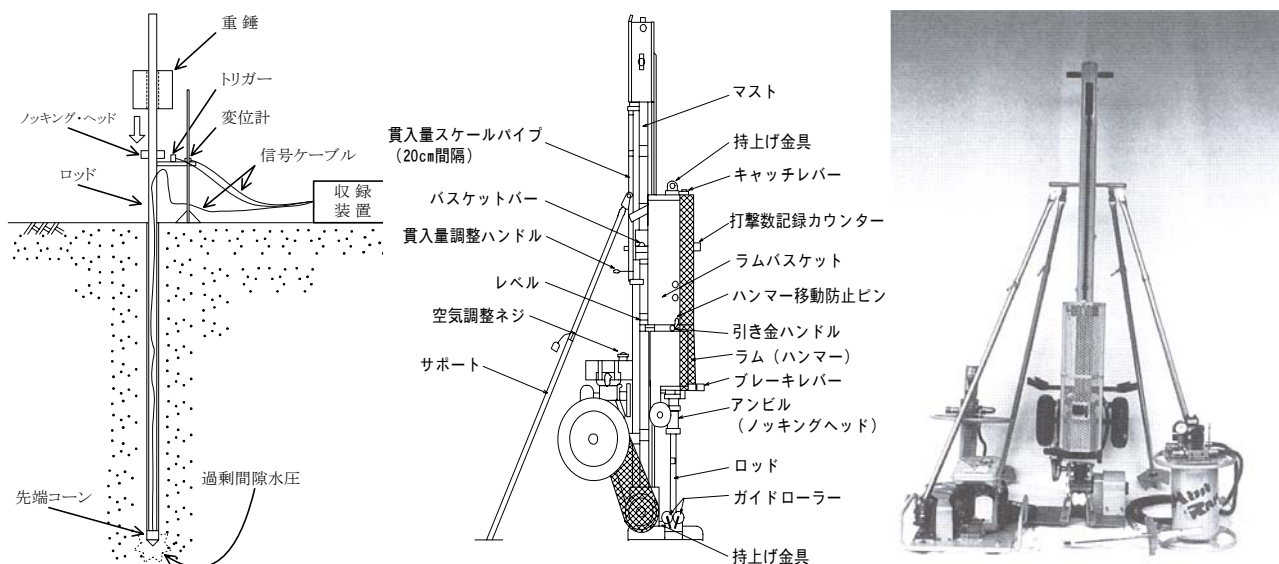


図-1 試験装置の構成概要 図-2 軽量型ラムサウンディング構造図 写真-1 軽量型ラムサウンディング

3. 原位置試験結果の評価

3.1 動的貫入強度（換算 N 値： N_d 値）の評価

図-3 には調査ボーリング近傍で実施した代表的 2 地点（A 地点，B 地点）でのミニラムの N_m 値を 1 打撃毎に SPT で得られる N 値に換算した換算 N 値（ N_d ）の深度分布を示す。同図には近傍で実施した SPT から得られる N 値（ N_{SPT} ）も重ねて示している。 N_d 値は N_{SPT} 値と一致する部分も見られるが，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され， PDC を用いた計測での深さ方向の分解能の高さが評価できる。

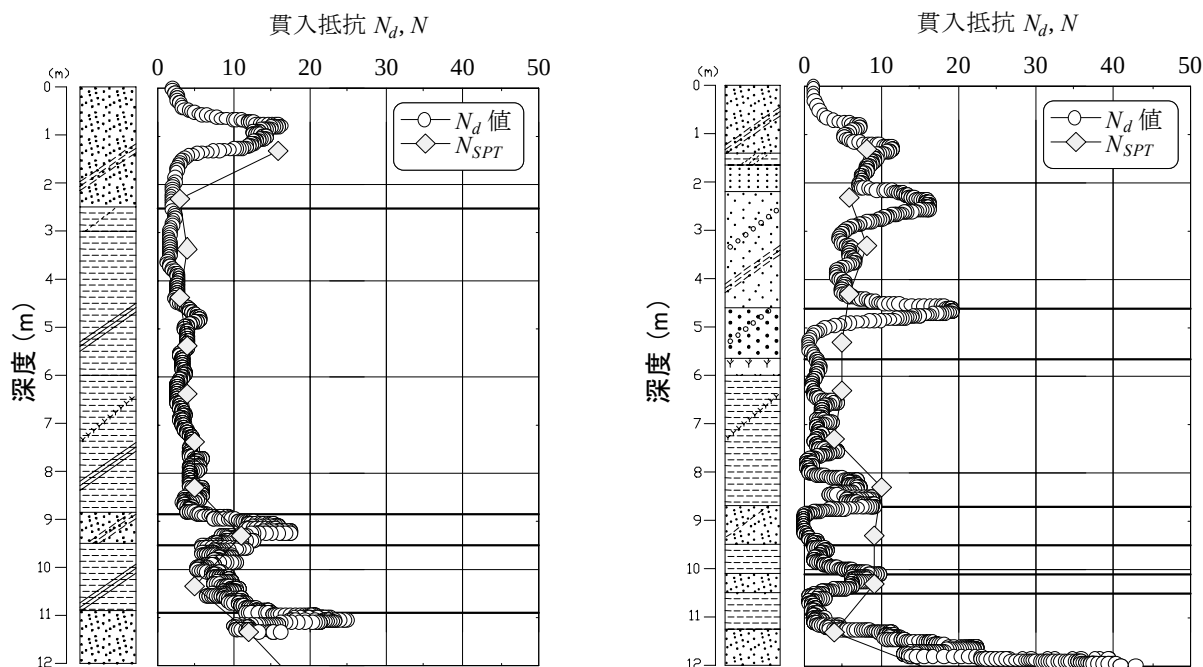


図-3 (a) 換算 N 値（ N_d ）の深度分布例（A 地点） 図-3 (b) 換算 N 値（ N_d ）の深度分布例（B 地点）

3.2 地下水位 (GWL) の評価

動的打撃時には重錘がノッキング・ヘッドに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及び間隙水圧量を高速($\Delta t=100\mu\text{sec}$)でデータ収録する。図-4 に計測された時刻歴応答例を示す。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・ヘッドに打撃してからリバウンドもしくは再貫入するまでの貫入変位量が増大している時間領域(以降「初期貫入フェイズ」と呼ぶ))の最大過剰間隙水圧比($\Delta u_{\text{max}}/\sigma_v$)を求める。この $\Delta u_{\text{max}}/\sigma_v$ の深度分布を図-5に示す。ここでの全上載荷重(σ_v)は次節で推定する土質区分により設定している。同図の $\Delta u_{\text{max}}/\sigma_v$ は地表面付近の浅い地盤では1以上の大きな値を示しているのに対し、ある深度以深で急激に1を下回り0付近に収束している。この1を下回り0付近で収束する深度はボーリング調査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)と良く一致している。この地下水位以浅で大きな $\Delta u_{\text{max}}/\sigma_v$ を発生させるのは、不飽和土中の空気存在により打撃慣性力による圧力センサーのダイアフラムの衝撃変形に対する拘束力が小さくなるのに対し、地下水位以深では飽和した間隙水の高い体積圧縮剛性により圧力ダイアフラムは拘束を受け打撃慣性力による $\Delta u_{\text{max}}/\sigma_v$ のピークは小さく計測されると推測している。図-6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す。同図の相関は非常に良いことが判る。

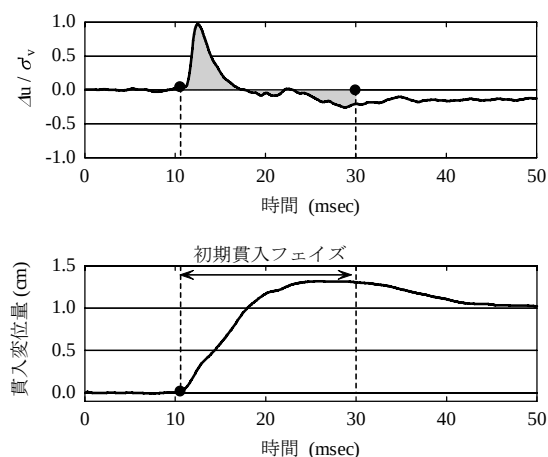


図-4 時刻歴応答例

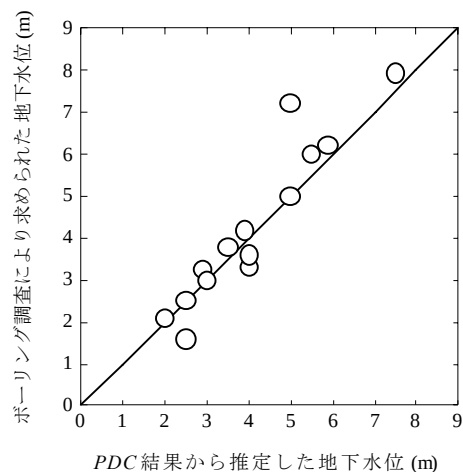


図-6 地下水位の計測地と推定値

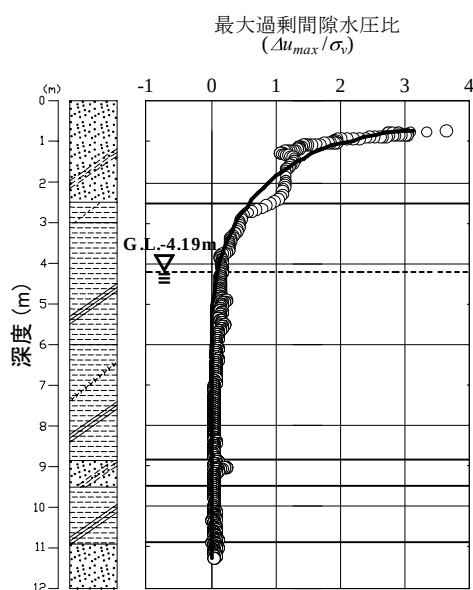


図-5 (a) 最大過剰間隙水圧比の深度分布例 (A地点)

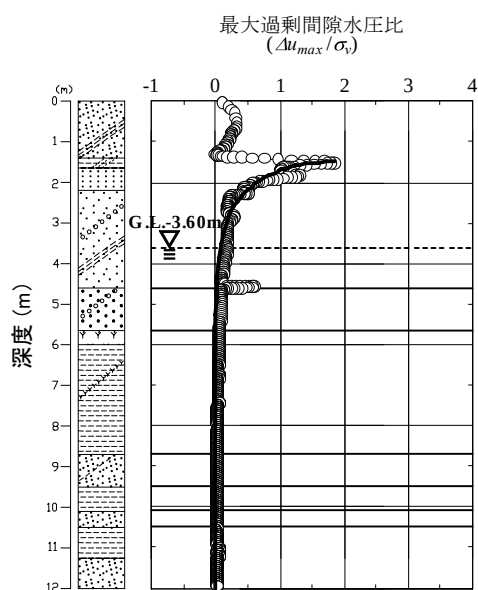


図-5 (b) 最大過剰間隙水圧比の深度分布例 (B地点)

3.3 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「初期貫入フェイズ」完了時点で残留する間隙水圧(u_R)が大きくなることが推測できる。図-7には(a)緩い砂質土と(b)細粒分を含む土の計測波形記録を示す。(b)の細粒分を含む土の「初期貫入フェイズ」完了時点での残留過剰間隙水圧比 (u_R / σ'_v) は推測とおりに残留していることが観察される。ここでの各深度の有効上載圧(σ'_v)は前節の GWL を用いて計算している。図-8には u_R / σ'_v と SPT で採取した攪乱試料を用いた室内土質試験(土の粒度試験)結果から得られた細粒分含有率(F_c)の関係を示す。 u_R / σ'_v と F_c の関係は相関が良く式(2)の関係が認められる。

$$F_c = 18 \cdot (u_R / \sigma'_v) \quad (2)$$

図-9には式(2)を用いて土質区分境界を図示した u_R / σ'_v の深度分布を示す。並列して示した調査ボーリングによる柱状図に示された土質区分と残留間隙水圧比から推定される土質区分の相関が良いことが判る。

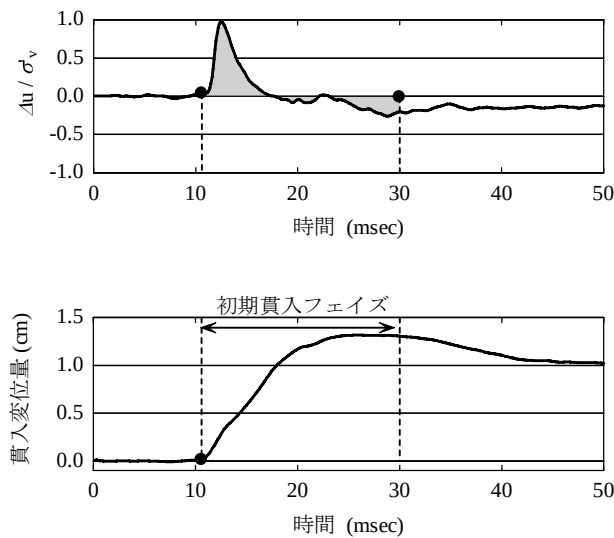


図-7(a) 緩い砂質土の時刻歴応答例
(深度=3.99m, N_d 値=9)

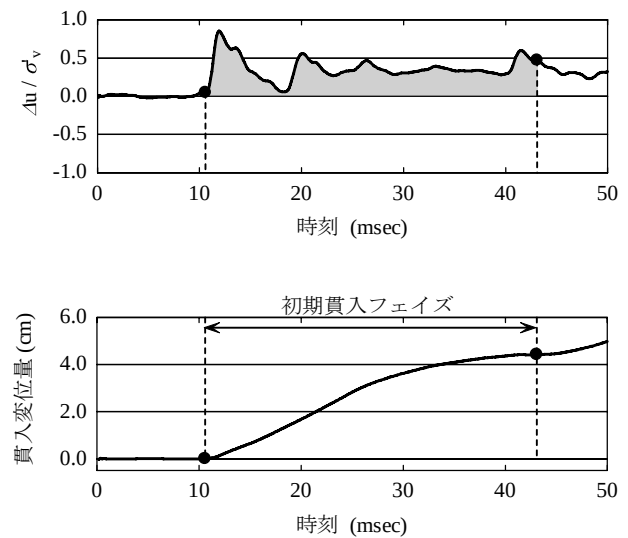


図-7(b) 細粒分を含む土の時刻歴応答例
(深度=2.56m, N_d 値=1)

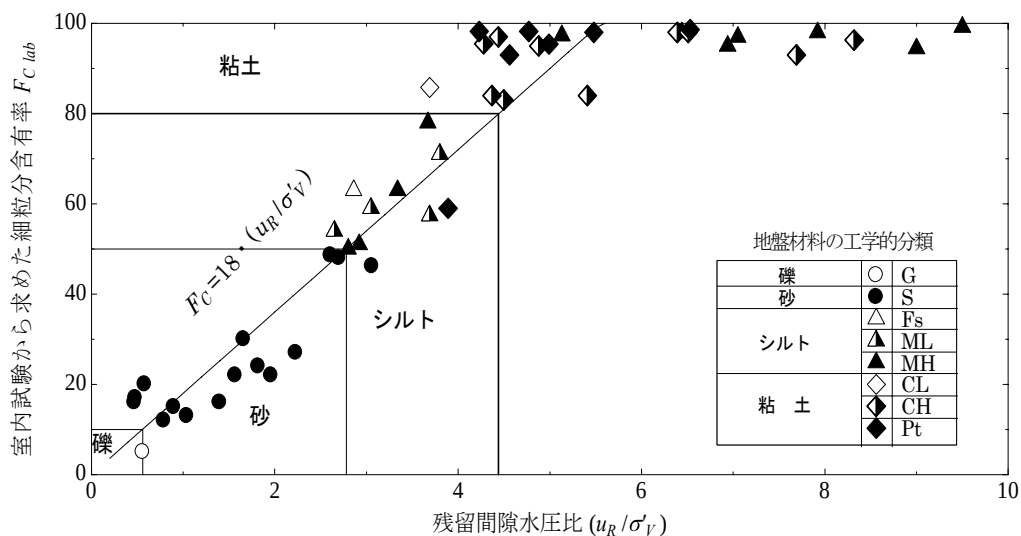


図-8 残留過剰間隙水圧と細粒分含有率 F_c の関係

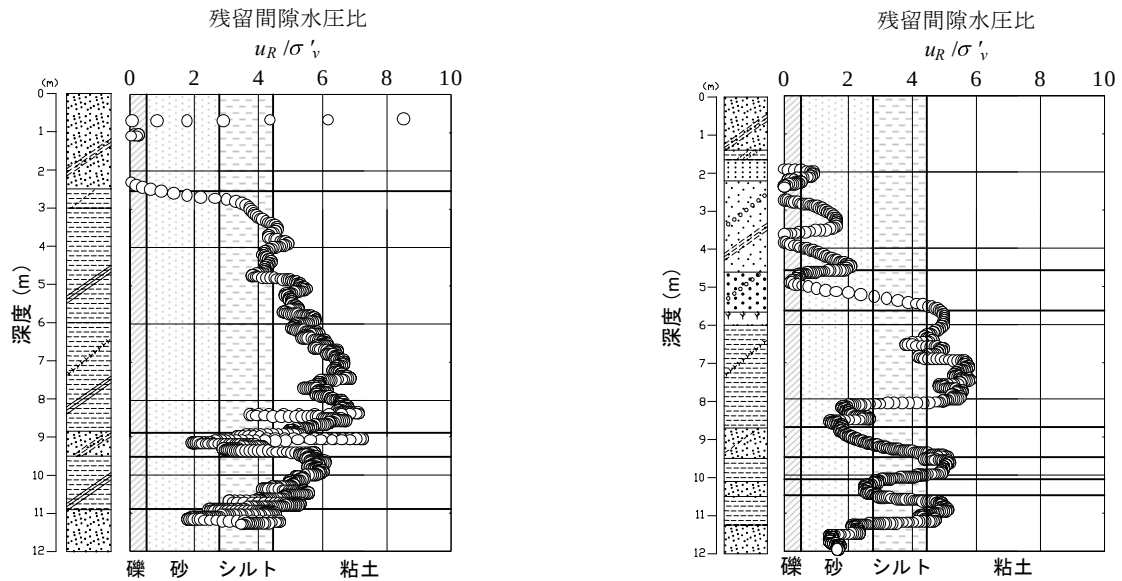


図-9 (a) 残留過剰間隙水圧比の深度分布例 (A地点) 図-9 (b) 残留過剰間隙水圧比の深度分布例 (B地点)

3.4 液状化強度 (R) の評価

PDC を用いた液状化強度の評価フローを図-10 に示す。フロー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(γ_t)の推定を行う必要がある。評価手順はまず、計測貫入量から求まる深度と仮定した γ_t から全上載圧(σ_v)を計算する。そして、先端コーンで計測される過剰間隙水圧応答の打撃直後の最大値(Δu_{max})から最大過剰間隙水圧比($\Delta u_{max} / \sigma_v$)を計算して一定値に収束する変化点から地下水位(GWL)を推定する。次に、GWL から算出される有効上載圧(σ'_v)を用いて残留間隙水圧比(u_R / σ'_v)を計算し、土質分類と細粒分含有率(F_c)を評価する。ここで、評価した土質分類から γ_t を再設定して σ_v と σ'_v を再計算し、再度 $\Delta u_{max} / \sigma_v$ から地下水位と u_R / σ'_v から土質分類を再評価する。土質分類より再評価された γ_t が概ね仮定値と一致していることを確認してイタレーションを終了する。ここで、 γ_t の設定値は一般に液状化が対象となる埋立地や沖積地盤では1.4~1.8程度と幅が限られていることからイタレーションも1度もしくは2度程度で完了できる。

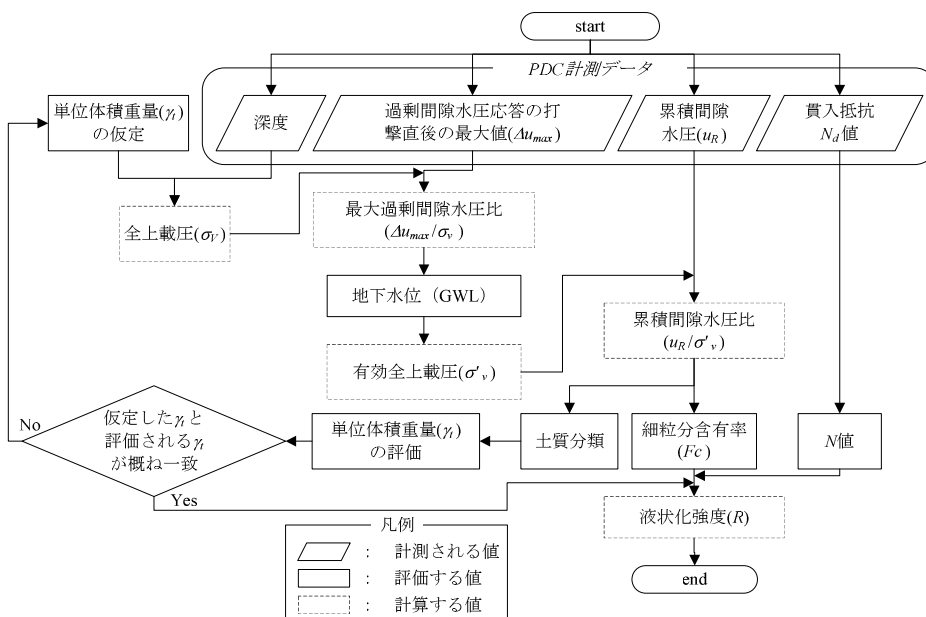


図-10 液状化強度の評価フロー

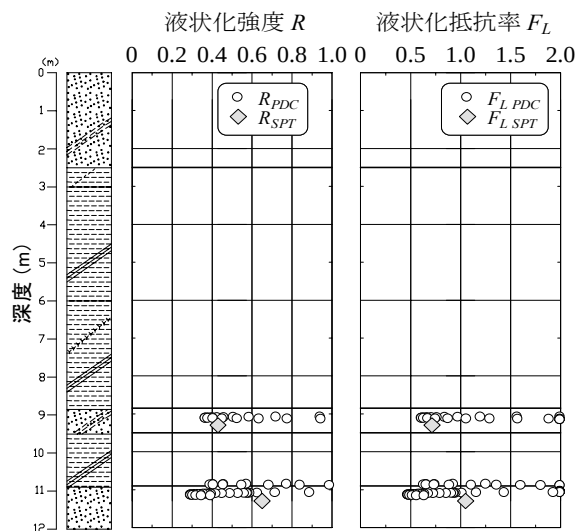


図-11(a) 液状化強度の深度分布例 (A 地点)

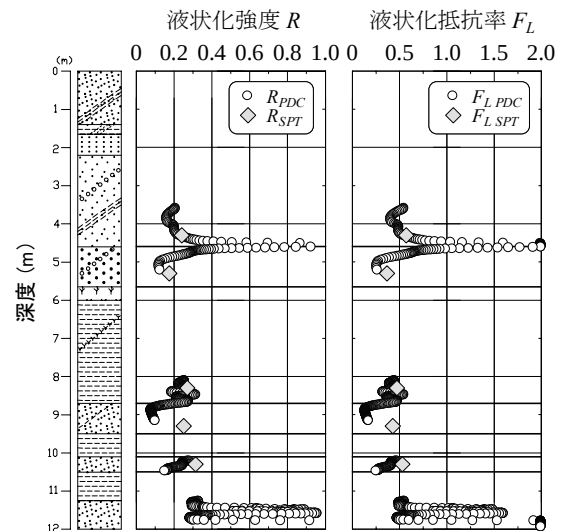


図-11(b) 液状化強度の深度分布例 (B 地点)

一方、計測される打撃貫入量からは換算 N 値(N_d)が計測され SPT の N 値相当に評価される。 PDC より得られる μ , F_C , N 値が求ま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る。 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土質区分により評価した液状化強度(R_{SPT})を比較して図-11 に示した。液状化判定は道路橋示方書¹²⁾に準拠して液状化抵抗率(F_L)を求めている。 F_L 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)についての結果を示している。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, F_L の分布が得られると共に, PDC を用いた液状化強度は従来法とも良く一致していることが判る。

3.5 液状化後の過剰間隙水圧消散に伴う沈下量の算定

間隙水圧想定を伴う動的コーン貫入試験 (PDC) 結果による液状化後の沈下量の算定フローを図-12 に示す。 PDC による過剰間隙水圧消散に伴う沈下量の算出手順は以下のとおりである。

- ①: PDC から細粒分含有率 F_C , 貫入抵抗 N_d , 層厚 H が測定される。
- ②: $F_C \sim e_{\max} - e_{\min}$ 関係¹⁰⁾より $e_{\max} - e_{\min}$ を算出する。
- ③: F_C によって定まる $e_{\max} \sim e_{\min}$ 関係¹³⁾と②より最大間隙比 $e_{\max}$ を算出する。
- ④: ③より ε_{vr} を算出する。
- ⑤: N_d より有効全上載圧 σ'_v を算出する。
- ⑥: σ'_v より推定相対密度 D_r を算出する。
- ⑦: D_r によって定まる $\varepsilon_{v\max} / \varepsilon_{vr} \sim e_{\max} - e_{\min}$ 関係¹¹⁾より $\varepsilon_{v\max} / \varepsilon_{vr}$ を算出する。
- ⑧: ④と⑦により最大体積ひずみ $\varepsilon_{v\max}$ を算出する。
- ⑨: N_d より液状化安全率 F_L を算出する。
- ⑩: $F_L \sim \varepsilon_v / \varepsilon_{v\max}$ 関係¹⁴⁾より $\varepsilon_v / \varepsilon_{v\max}$ を算出する。
- ⑪: $\varepsilon_v / \varepsilon_{v\max}$ と⑧より体積ひずみ ε_v を算出する。
- ⑫: H と⑪により沈下量が計算される。

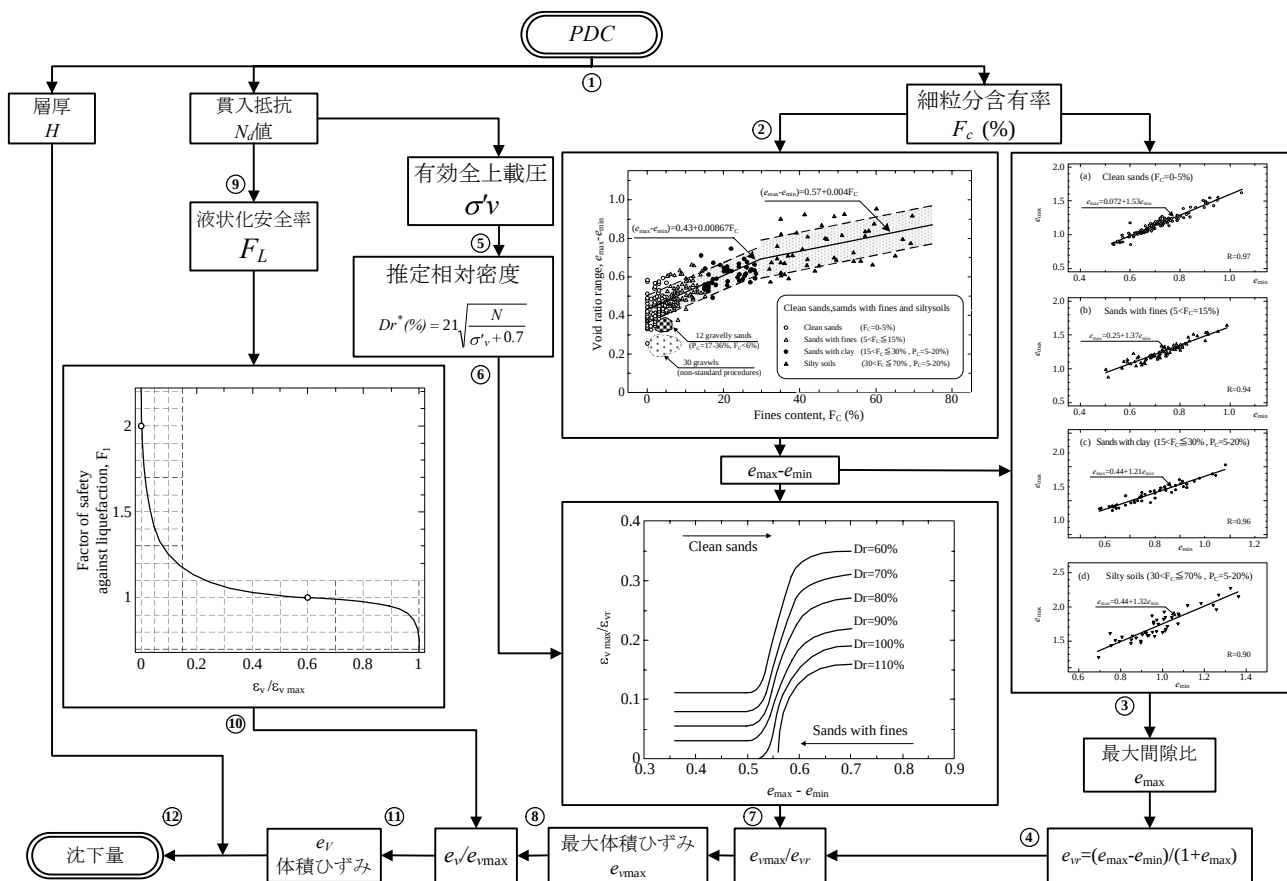


図-12 Piezo Drive Cone を用いた液状化後の沈下量の算定フロー

4. 実物大液状化実験の計測計画と結果

石狩湾新港における「空港施設における実物大液状化実験」の実験区域内の滑走路舗装実験ゾーンと盛土実験ゾーンの間に設置されたファシリティゾーンにおいて、図-13 に示すとおり 20m 間隔で 19 箇所の PDC を実施した。計測深度は GL-10m を目処に実施している。結果の評価は、滑走路舗装を含め地盤改良を行っていない測線 (Line-1) の 120m 区間 (No.1-1~No.1-7) の直線区間と、ファシリティゾーンの 60m×60m 範囲 (Aria-1) で 4×4 地点 (No.1-1~No.4-4) の 20m 間隔の格子状平面区間の 2 箇所で行う。PDC より得られた Line-1 の推定土質断面図を図-14 に示すと共に Aria-1 の土質断面鳥瞰図を図-15 に示す。Line-1 から測線中央部の No.1-4~No.1-6 区間で埋立粘性土(F_c)層が消失し、軟弱な上部埋立砂質土(F_{S1})の下端深度も深く潜り

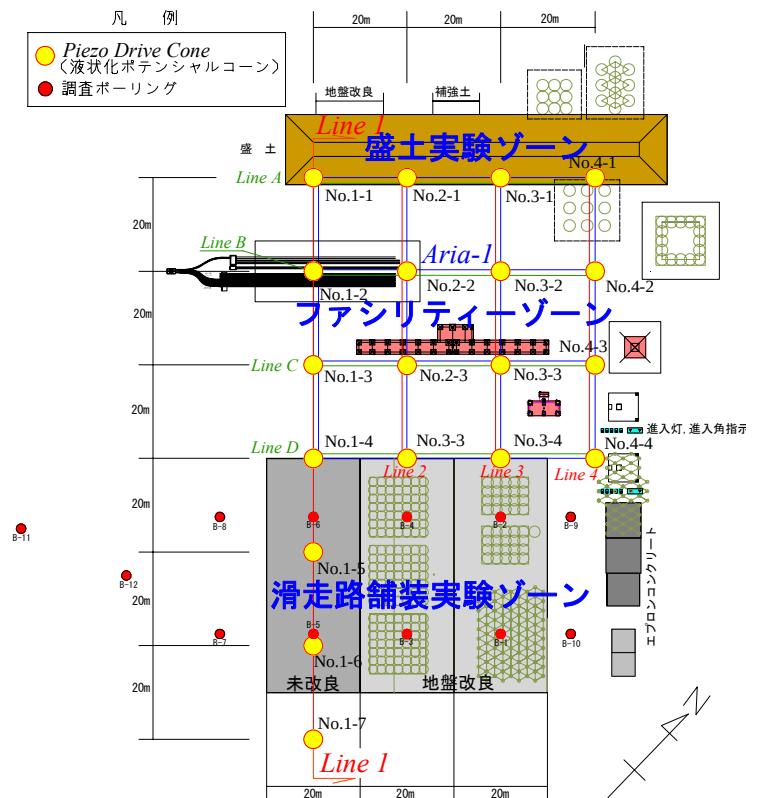


図-13 液状化実験平面図および調査地点位置図

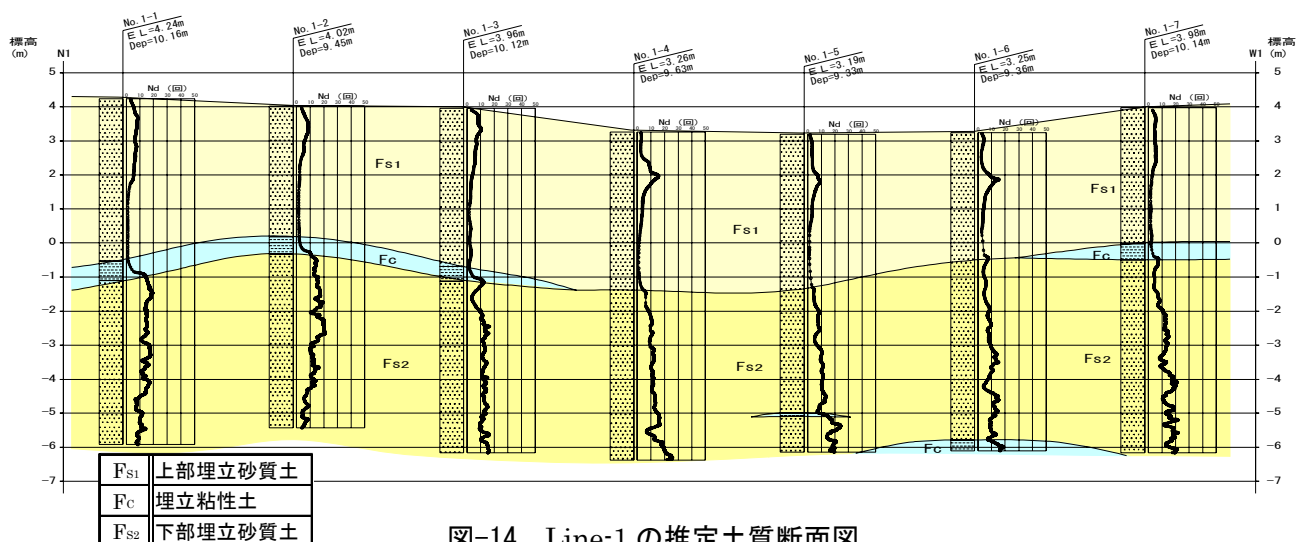


図-14 Line-1 の推定土質断面図

込んでいることが判る。一方, Aria-1 の鳥瞰図からは, Line-2 近傍で上部埋立砂質土(F_{s1})層の下端深度が深くなっている。 PDC を用いた液状化後の過剰間隙水圧消散に伴う沈下量の予測結果として Line-1 の断面図を図-16 に, Aria-1 の鳥瞰図を図-17 に示した。予測は道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編¹²⁾ の方法に準拠してレベル 2 地震動のタイプ I (プレート境界型の大規模な地震) について地盤面における設計水平震度 k_{hg} を 0.25 とした予測結果を示している。一方, 同図には実験実施 10 日後 (2007/11/7) のレベル測量結果を基に実測の沈下量も併記した。なお PDC 計測位置において地盤改良部や噴砂孔に当たり地盤面の高さが適切に評価できなかった観測地点においては近傍の測量データの平均値を採用している。ここで近傍の値を採用した地点については図中に○印で表している。

Line-1 の測量結果からは, $k_{hg}=0.25$ とした予測結果を少し下回る沈下量となっている。この理由としては No.1-4～No.1-7 区間はアスファルト舗装区間であり, 表層にあるアスファルト材の水平方向の引張り抵抗の発揮により沈下が抑制されたとも考えられる。しかし, 実測沈下量の大小傾向はほぼ整合的であり予測と良く一致している。このことから今回の実物大液状化実験では土木構造物のレベル 2 地震動の標準値 (港湾・空港関係では下限値) として示される $k_{hg}=0.25$ 程度の地震力に相当する作用があったことが推測される。一方 Aria-1 では予測沈下量と実測沈下量が非常に良い整合となっていて CDP による地下量の予測がかなり高い精度で可能であることが確認できる。

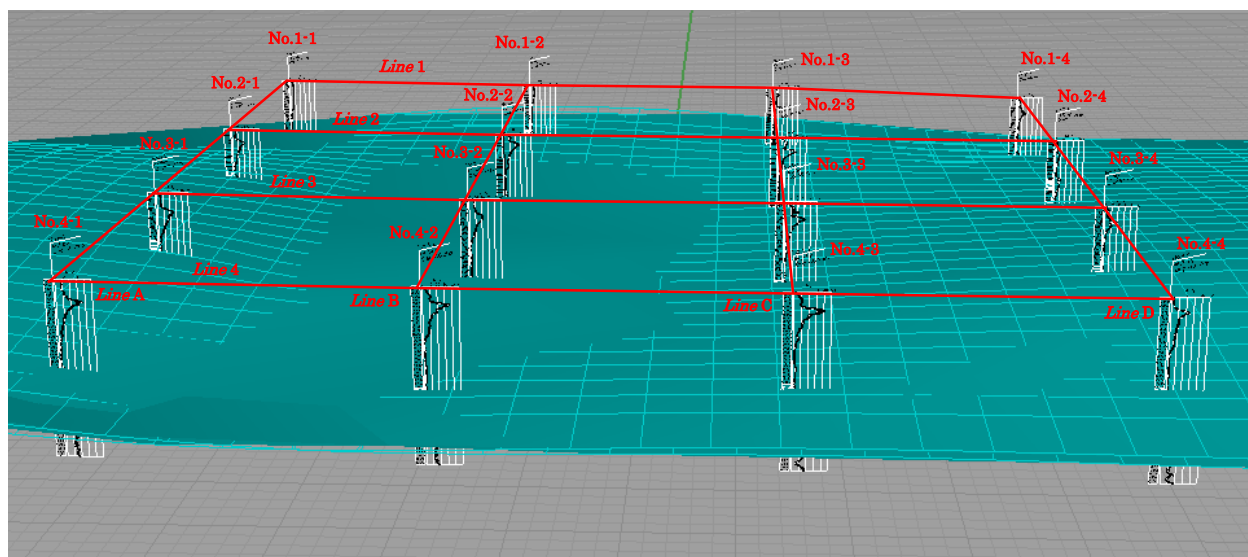
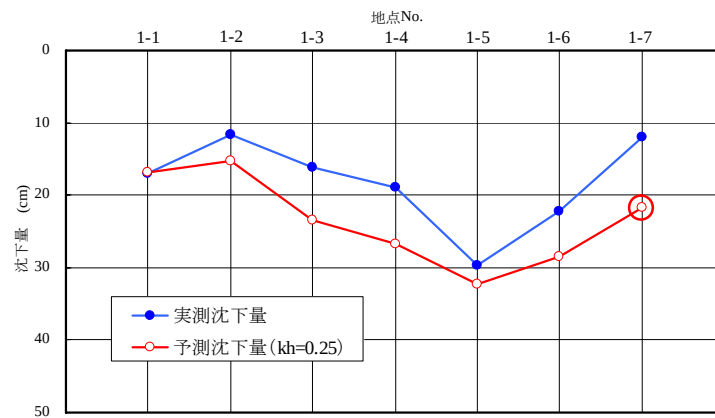
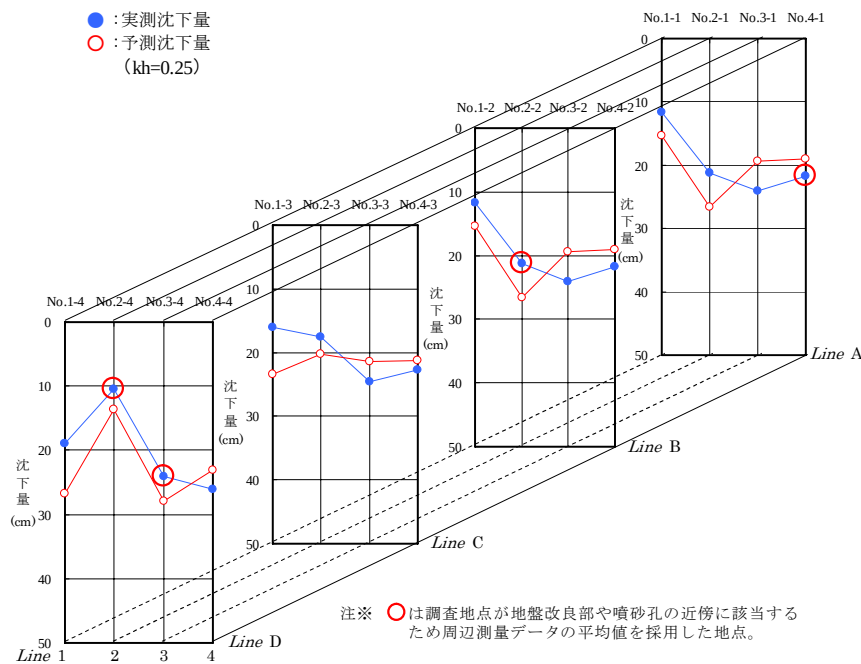


図-15 Aria-1 の土質断面鳥瞰図 (上部埋立砂質土(F_{s1})層下端深度)



注※ ○は調査地点が地盤改良部や噴砂孔の近傍に該当するため周辺測量データの平均値を採用した地点。

図-16 沈下量の予測値と実測値の比較 (Line-1)



注※ ○は調査地点が地盤改良部や噴砂孔の近傍に該当するため周辺測量データの平均値を採用した地点。

図-17 沈下量の予測値と実測値の比較 (Aria-1)

5. あとがき

本論文では、まず調査ボーリングにおける *SPT* で求めた *N* 値および採取した攪乱試料の室内土質試験結果を待って算定していた液状化強度が、原位置での間隙水圧測定を伴う動的貫入試験法 (*Piezo Drive Cone (PDC)*:ピッツドライブコーン) を用いることにより簡易に短時間で評価が可能であることを紹介した。続いて、2007 年 10 月 27 日に実施した「空港施設における実物大液状化実験」により水平地盤における液状化に伴う過剰間隙水圧消散に伴う地下量の予測と実測結果の比較を示した。この結果比較から広範囲に渡る施設エリアにおいて構造物の不同地下が簡易に短時間で高い精度を有して予測可能なことを示した。*PDC* を用いることによって得られる性能を下記に列挙する。

- ① これまでサウンディングでは困難であった地下水位 (*GWL*) および細粒分含有率 (*Fc*) をパラメータとした土質区分が評価できる。
- ② 連続貫入が可能となるサウンディングの特性から、連続的な換算 *N* 値 (*N_d* 値) と間隙水圧応答の情報を基に地盤の薄層をも評価した液状化強度が評価できる。
- ③ 平面的な展開により、不均質で不確実な地盤の空間的性状を評価できる。

- ④ 液状化後の過剰間隙水圧消散に伴う沈下量を高い空間的分解能を有して評価が可能であり，個別の施設については不同沈下も定量的に評価できる。

ただし，本実験は発破により地盤を液状化させる原理から実際の地震動となる実体波（せん断波：S 波）の繰り返し応力で発生する液状化現象とは厳密には異なる。従って，地震動の大きさを表現する加速度の評価も地震時の場合と異なることを認識する必要がある。この意味で今回の予測に用いた地盤面における設計水平震度 $k_{hg}=0.25$ の大きさの評価は液状化計算上で正しく合致しているものではないとの指摘は課題として残っている。しかし，いずれの方法によっても地盤中の過剰間隙水圧が上昇することにより地盤は液状化が生じたことには違いはなく，その発生した過剰間隙水圧消散に伴う沈下量を高い空間的分解能を持って不同沈下の予測まで出来た事は事実である。今後は，空港施設を始めとした構造物の不同沈下（傾斜）被害を簡易に評価できる新しい調査方法として採用し，調査データの蓄積と共に更なる精度向上を目指して行きたい。

【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, pp.305-312.
- 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，pp. 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，pp.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，pp.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，pp.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，pp.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，pp.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，pp.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，pp.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，pp.451-452.
- 11) 伊藤義行，小川重之，岩崎智久，村田芳信，佐藤将 [2002]. 小型オートマチックラムサウンディング試験による地盤評価，第 37 回地盤工学研究発表会(大阪)，pp.103-104.
- 12) (社)日本道路協会[2002]，道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，pp.120-126.
- 13) Cubrinovski, M. and Ishihara, K. [2002]: Maximum and minimum void ratio characteristics of sand, Soils and Foundations, Vol. 42, No. 6, pp. 65-78..
- 14) Tsukamoto, Y., Ishihara, K. and Sawada, S. [2004]. Settlement of silty sand deposits following liquefaction during earthquakes, Soils and Foundations, Vol. 44, No. 5, pp-135-148.