

# 締固め砂杭工法の杭間締固め効果に及ぼす 細粒分と排水性の影響

山崎浩之<sup>1</sup>・森川嘉之<sup>2</sup>・小池二三勝<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 港湾空港技術研究所 地盤・構造部 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)

<sup>2</sup>正会員 工博 港湾空港技術研究所 地盤・構造部 (同上)

<sup>3</sup>港湾空港技術研究所 地盤・構造部 (同上)

締固め砂杭工法(サンドコンパクションパイル工法)は、密度増加による代表的な液状化対策工法である。同工法の設計、すなわち圧入率あるいは置換率(以下本論文では圧入率とする)とよばれる砂杭面積の原地盤に対する占有率の設定は、原地盤N値、細粒分含有率、改良目標N値を用いる設計法で行われることが多い。本論文では、圧入後の増分N値に及ぼす細粒分含有率の影響に関する考察を行っている。そして、既に提案した改良後N値の予測手法に考察結果を反映させ、提案手法の改良・精度向上を行っている。さらに、改良された予測手法を用いて、砂杭圧入速度、砂杭圧入間隔の締固め効率におよぼす影響について考察を行い、砂杭圧入速度が締固め効率に影響をおよぼし、圧入速度が遅い方が締固め効率は良くなることを示している。

**Key Words:** sand compaction pile method, SPT N-value, liquefaction countermeasure, fines

## 1. はじめに

締固め砂杭工法(サンドコンパクションパイル工法、以下SCP工法)は、液状化対策工法において密度増加を改良原理とする代表的な工法で、最も多く採用されている。SCP工法は、径40cmのケーシングを地盤内に貫入させ、ケーシング内に砂を補給しながら径70cmの砂杭を地盤に圧入打設し、地盤を締固めて密度増加をはかるものである。SCP工法の液状化対策の設計においては、杭間のN値が目標N値に達するように、砂杭の圧入率(改良率)すなわち圧入間隔が決定される。目標N値の設定方法には、A法、B法、C法と呼ばれる方法があり、C法が最も汎用的な方法で最も良く用いられている<sup>1)</sup>。

著者らは、現場でのSCP工法の実績を集積しC法が原地盤N値の影響を適切に反映していないことを示し、その原因がC法で仮定している締固めメカニズムにあることを既に指摘した。そして、C法とは全く異なるメカニズムに基づいて新たに砂杭圧入後の杭間N値を予測する手法を提案した<sup>2), 3)</sup>。提案された方法の締固めメカニズムは、杭間の締固めを砂杭圧入によるせん断で生じる負のダイレイタンシー(体積圧縮)の蓄積と捉えたものである。しかし、提案法は細粒分含有率の影響が過小評価される傾向であった。

そこで本論文では、細粒分含有の締固めに及ぼす影響を、提案法の根拠となっている繰返しせん断中のダイレイタンシー挙動に遡って検討し、提案法の改良を行うものとする。検討方法はSCP工法の設計で取得される土質データが原地盤のN値と細粒分含有率だけである実状を踏まえ、室内の要素試験などで得られている砂質土の土質力学的特性を定性的に利用して、過去のSCP工法のN値と細粒分含有率に関するデータを解析する半経験的なものである。そして、提案モデルに細粒分含有率に関する改良を行い、改良モデルの検証を行う。さらに、改良モデルを用いて砂杭圧入速度、圧入間隔の地盤の締固め効果におよぼす影響に関する考察も行う。

## 2. 提案法と細粒分含有率の関係

### (1) 提案法と誘導過程<sup>2), 3)</sup>

著者らが既に提案した方法は、原地盤換算N値、圧入率、細粒分含有率が与えられれば、圧入後の増分換算N値を予測できるものである。本節では既に提案した方法の誘導過程を以下に示す。

提案法の誘導過程は相対密度の増加と圧入率の関係の部分と、N値と相対密度の関係の部分からなっている。

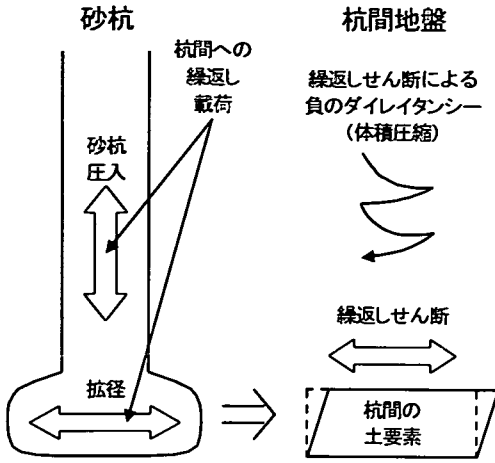


図-1 締固めメカニズムの模式図

このうち、前者が砂杭圧入による締固め効果予測の本質に関わる部分で、後者はサウンディングに相当する部分である（したがって、後者は相対密度と関連づける指標がN値以外で適切であれば、それと置き換えて良い）。

提案法は、相対密度と換算N値の関係について吉見の整理したデータに基づいた関係<sup>4)</sup>を利用した場合、Meyerhofの式<sup>5)</sup>を用いた場合のもの2種類が提案されている。両者は、原地盤換算N値が小さなところで予測N値にやや大きな差が現れ、Meyerhofの式を用いた方が小さめのN値を予測する。このような違いがあるが、これは相対密度とN値の関係式に関わるもので、すなわちN値から相対密度を推定する際の誤差で、砂杭圧入による締固め効果の本質に関わるものではない。本論文では相対密度とN値の関係をMeyerhofの式とした増分N値の予測式<sup>3)</sup>を取り上げて議論を進める。以下に誘導過程の概略を示す。

提案法では、図-1のように砂杭圧入を地盤に対する外力と捉え、砂杭圧入の繰返しせん断により発生する負のダイレイタンスーにより杭間地盤の締固め（体積圧縮）が進むと考えている。そして、繰返しせん断により累積する体積圧縮ひずみを算定するため、福武の提案した「おわんモデル」<sup>6)</sup>を利用して、繰返しせん断による累積せん断ひずみと体積圧縮ひずみの関係を下記のような体積ひずみが1/bに漸近する双曲線関係としている。

$$\varepsilon^* = \frac{\gamma^*}{a + b\gamma^*} \quad (1)$$

ここに、 $\varepsilon^*$ は杭間のN値計測位置での体積圧縮ひずみ（負のダイレイタンスー）、 $\gamma^*$ は杭間のN値計測位置での累積せん断ひずみ、 $a$ と $b$ は定数である。杭間の体積圧縮ひずみは杭間の土が最も緩い状態（最大間隙比 $e_{max}$ ）をゼロ

として定義する。また、累積せん断ひずみは正八面体面上のせん断ひずみのように物理的に厳密なせん断ひずみではなく、杭間地盤の繰返しせん断履歴の大きさを表す量である。

累積せん断ひずみが得られれば体積圧縮ひずみを得られるが、累積せん断ひずみは砂杭の圧入率の関数として、次式で表されると仮定している。

$$\gamma^* = f(F_v) \quad (2)$$

$$= \kappa_0 F_v + \gamma_{v0}^* \quad (3)$$

ここに、 $\kappa_0$ は比例係数、 $F_v$ は圧入率、 $\gamma_{v0}^*$ は圧入率がゼロにおける杭間の累積せん断ひずみである。なお、式(3)で $\gamma_{v0}^*$ を置いた理由は式(1)において体積圧縮ひずみ $\varepsilon^*$ を最大間隙比でゼロとしているため、圧入率がゼロの未改良地盤でも最大間隙比でなければ既に体積圧縮ひずみが発生していることになり累積せん断ひずみがゼロにはならないからである。

次に相対密度 $D_r$ は下式で定義されるものである。

$$D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \quad (4)$$

ここに、 $e$ は間隙比、 $e_{max}$ は最大間隙比、 $e_{min}$ は最小間隙比である。

式(1)の体積ひずみ $\varepsilon^*$ は次式で与えられる。

$$\varepsilon^* = \frac{-\Delta e}{1 + e_{max}} \quad (5)$$

$$= \frac{e_{max} - e}{1 + e_{max}}$$

式(1)、(3)、(5)から、式(4)は次式になる。

$$D_r = \frac{\kappa F_v + \gamma_{v0}^*}{c_1/c_2 + (\kappa F_v + \gamma_{v0}^*)} \quad (6)$$

$$c_1 = e_{max} - e_{min} \quad (7)$$

$$c_2 = 1 + e_{max} \quad (8)$$

ここに、 $\kappa = \kappa_0/a$ 、 $\gamma_{v0}^* = \gamma_{v0}^*/a$ 、 $b = c_2/c_1$ である<sup>2)</sup>。

式(6)が提案法での圧入率と相対密度の関係を表すものである。

次に、換算N値と相対密度の関係はMeyerhofにより次式で提案されている。

$$D_r = 0.16 \sqrt{N_{98}} \quad (9)$$

$$N_{98} = \frac{167}{69 + \sigma'_v} N \quad (10)$$

ここに、 $N_{98}$ は換算N値、 $N$ は計測されたN値、 $\sigma'_v$ (kN/m<sup>2</sup>)はN値が計測された位置での有効上載圧。

式(6)と式(9)を連立させて相対密度を消去することにより、次式で示すN値増加の予測式を得る。

$$N_1 = C_M \left( \frac{\kappa F_v + \gamma_i^*}{c_1/c_2 + (\kappa F_v + \gamma_i^*)} \right)^2 \quad (11)$$

$$\gamma_i^* = \frac{\sqrt{N_0/C_M}}{(c_2/c_1)(1 - \sqrt{N_0/C_M})} \quad (12)$$

$$e_{\max} = 0.02 F_c + 1.0 \quad (13)$$

$$e_{\min} = 0.6 \quad (14)$$

ここに、 $N_0$ 、 $N_1$ は砂杭圧入前後の換算N値、 $F_c$ (%)は細粒含有率(粒径75 $\mu$ m以下)、 $C_M = (1/0.16)^2$ である。

式(13)、(14)は平間の実験データ<sup>7)</sup>に基づく式<sup>9)</sup>と沼田らの研究成果<sup>9)</sup>を活用して得たもので、最大間隙比、最小間隙比と細粒含有率の関係の実験式である。なお、平間の実験データに基づくオリジナルの実験式では最小間隙比についても細粒含有率の項があったが、式(14)ではこの項が除かれたものとなっている。これは、沼田らの研究を参考にすると、式(14)の最小間隙比を用いた方が、換算N値と相対密度の間により良い相関が得られるからである。また、パラメータ $\kappa$ を室内試験から求めるのは難しいので、式(11)、(12)を下式のように変形して細粒含有率が $F_c = 30\%$ 以下の地盤におけるSCP工法のN値増加の実績から求め、平均的に $\kappa = 5$ が得られた。

$$\kappa = \frac{(c_2/c_1)\gamma_i^*(1 - \sqrt{N_1/C_M}) - \sqrt{N_1/C_M}}{(c_2/c_1)F_v(\sqrt{N_1/C_M} - 1)} \quad (15)$$

## (2) 増分換算N値と細粒含有率の関係

図-2の●プロットはSCP工法による地盤の換算N値の増分と細粒含有率関係の実測値、○プロットは式(7)、(8)、(11)~(14)に示した提案法( $\kappa = 5$ )による予測値で、実線は各プロットを線形回帰近似したものである。また、図-2にはC法による予測値を参考として△プロットで示す。図-2の各実測値は、我が国の港湾・空港における国の直轄事業として実施された圧入率が $F_v = 0.07 \sim 0.2$ のSCP工法のものである。集積したデータの内、圧入前後の土質調査で細粒含有率の差が10%以上のものは削除されている。また、対象としたSCP工法の施工法は、静的な締固めによるものは除外したが、打戻し方式など締固め方式については不明である。

図-2から、実測の増分換算N値は細粒含有率の増加

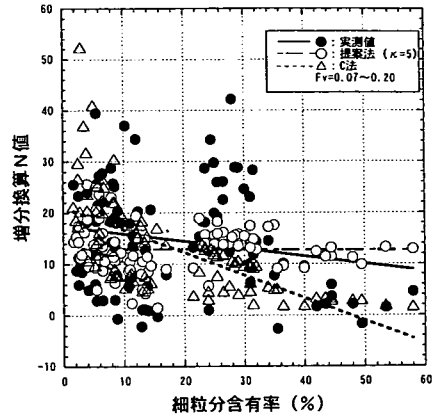


図-2 増分換算N値と細粒含有率の関係( $F_v = 0.07 \sim 0.20$ )

に伴い低下しており、細粒含有率30%付近での大きな増分換算N値を除いてみるとかなり低下しているのであるが、提案法による予測値はほとんど低下していない。これは式(7)、(8)、(11)~(14)の提案法では砂杭圧入による締固め効果におよぼす細粒含有の影響が過小評価されているためである。一方参考として示したC法では、N値増加におよぼす細粒含有の影響が考慮されているために、予測値は細粒含有率とともに大きく低下しており、その程度は実測値よりも大きなものとなっている。なお、細粒含有率が30%付近での大きな増分換算N値については異常値の可能性があるが、削除する根拠が得られなかったのでプロットしたものである。

## (3) 締固め効果におよぼす細粒含有率の影響

締固め効果を相対密度の増加を介してN値の増加で評価するとき、細粒含有率が高くなった場合の影響は、①圧入時の間隙の減少(体積圧縮)が妨げられ相対密度の増加が小さくなること、②最大間隙比が大きくなるため間隙比の増加が同じでも相対密度の増加(N値の増加)が小さくなること、③相対密度の増加が同じでも細粒含有率が高くなると相対密度とN値の関係式の適用性が悪くなること、が考えられる。上記①、②、③のうち、提案法では②の影響は式(13)で既に組み込まれているが、①と③については評価されていない。このことが、提案法(式(7)、(8)、(11)~(14))が細粒含有率の影響を過小評価する原因と考えられる。ここで、③については締固め効果におよぼす細粒含有の影響ではなく細粒が多い地盤のサウンディング(相対密度について)をN値で行っても良いかということであるが、式(14)で参考にした沼田らの研究<sup>9)</sup>によると最大密度(最小間隙比)試験を特別な方法で行えば、細粒含有率の小さい砂からシルトに近い材料までN値と相対密度の関係をほぼユニークな関係で表せるようである。また、本論文では実際

の SCP 工法による N 値増加の実測値を用いて細粒分含有率による補正式を提案するので、その段階で③に関する影響はある程度考慮されることになるを考える。このようなことから、以下では③については特に考察せず、締固め効果の本質である①について考察する。

提案法では圧入による間隙の減少(体積圧縮)を式(1)、(3)で求めている。したがって、①に関する細粒分含有率の影響は、式(1)あるいは式(3)のパラメータに反映させることになる。式(3)は圧入率と累積せん断ひずみを関連づける式で、外力(砂杭圧入・拡張により地盤に与える変位)と発生する杭間地盤のせん断ひずみの関係を示すものである。したがって、式(3)の $k_0$ には砂杭圧入方法の違いが大きく影響し、細粒分含有率の影響は小さいと考えられる。式(1)は累積せん断ひずみから負のダイレイタンスを求める式で、繰返しせん断と発生する体積ひずみの関係を示すものである。福武は室内試験結果から「おわんモデル」のパラメータが2つの要素に依存することを示している<sup>10)</sup>。一つはせん断前の圧密圧力で圧密圧力が大きい方が負のダイレイタンスが大きくなるようにパラメータが設定される。二つめはせん断時の排水条件で完全排水条件下と非排水条件下で分けており、非排水せん断の方が負のダイレイタンスの発生を小さくするようにパラメータが設定される。これら2つの内、細粒分含有率と関係が大きいのはせん断中の排水性であると考えられる。

図-3 は繰返しせん断中の排水性が体積圧縮に及ぼす影響を確認したもので、非排水条件、(完全)排水条件のそれぞれの条件下で両振幅軸ひずみ 1%のひずみ制御による繰返し三軸試験を行った場合の体積圧縮ひずみと累積せん断ひずみの関係を示したものである。用いた試料は相馬6号砂と相馬6号砂に黒土を混合し細粒分含有率を20%にした混合土の2種類で、圧密圧力は $\alpha' = 98 \text{ kN/m}^2$ である。また、非排水せん断での体積圧縮ひずみは、繰返し回数が1回、10回、100回になったときに初めて排水して求めたもので、それぞれ圧密後の排水履歴はない。せん断ひずみは排水せん断の場合はポアソン比 $\nu = 0.3$ 、非排水せん断の場合は $\nu = 0.5$ として求めている。なお、この場合の体積圧縮ひずみと累積せん断ひずみは繰返しせん断開始時をゼロとしたものである。

図-3 から、前述したように排水条件下で繰返しせん断を行った方が非排水条件下で行ったものよりも大きな体積圧縮ひずみが発生することがわかる。その差は、累積せん断ひずみ30%では排水せん断の方が約2倍の体積圧縮ひずみとなっている。同一体積圧縮ひずみでみると、体積圧縮ひずみ2%に対して非排水せん断の方が約3倍の累積せん断ひずみとなっている。したがって、排水性の締固め効果への影響は、式(1)において排水性の違いにより体積圧縮ひずみの増加が変わるようにして反映させ

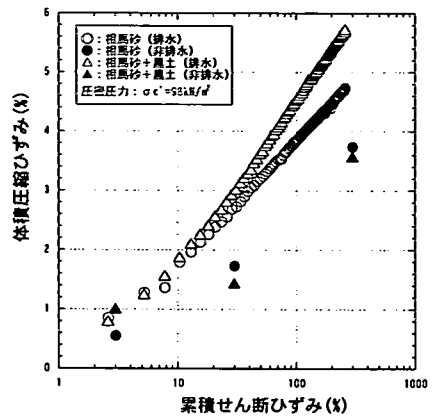


図-3 繰返しせん断による体積圧縮ひずみ

れば良いことがわかる。そこで、次項で排水性と細粒分含有率の関係について調べる。

#### (4) 排水性におよぼす細粒分含有率の影響

地盤の外力に対する排水性は透水係数、体積圧縮係数、排水距離、外力の作用時間に依存し、ここでは圧密理論を参考に以下のような正規化された量を排水性を表す指標と考える。

$$C = C_v t / L^2 \quad (16)$$

$$= k t / (\gamma_w m_v L^2) \quad (17)$$

ここに、 $C$  は排水性を表す指標 (以降では排水係数とする)、 $C_v$  は圧密係数、 $k$  は透水係数、 $t$  は外力の作用時間、 $\gamma_w$  は水の単位体積重量、 $m_v$  は体積圧縮係数、 $L$  は排水距離である。

ここで、圧密係数 $C_v$ が大きくなるとそれに反比例して圧密終了時間が短くなり排水性は良くなる。排水距離 $L$ が長くなるとその自乗に比例して圧密終了時間は長くなり排水性は悪くなる。また、荷重のかかっている時間 $t$ が長い方が荷重による圧密量は大きくなり良く排水することになる。以上のようなことを式(16)、(17)は示しており、 $C$  が大きい方が排水性は良いことになる。ここで上式の各パラメータを大まかに検討すると、透水係数は細粒分含有率に大きく影響され液状化対策が必要となる土層の場合透水係数は $k = 1 \sim 10^{-5} \text{ cm/s}$ 程度の範囲と考えられる。体積圧縮係数は液状化が問題となる地盤ではほぼ同じ値で $m_v = 10^{-5} \text{ m}^2/\text{kN}$ 前後のオーダーである。排水距離は圧入されている砂杭間隔や土層厚さなどの関数となるが、砂杭間隔から考えると $L = 1 \sim 3 \text{ m}$ の数メートル、土層厚さから考えると $L = 10 \text{ m}$ 程度と考えられる。載荷時間 $t$ はSCP工法の場合には砂杭が圧入されて周囲の地盤を押し広げている時間になる。SCP工法の場合には

10mの砂杭一本の圧入が終了するのに標準で約20分  
 かり単位長さあたり $t=2$ 分の載荷時間と考えられ施工法  
 を変えない限り大きく変化するものではない。したがっ  
 て、パラメータ $C$ に影響を及ぼす因子のうち透水係数は  
 排水係数 $C$ を6オーダー変化させ最も影響が大きく、SCP  
 工法において排水性の変化を支配するのは透水係数であ  
 ると結論される。ここで、透水係数と細粒分含有率の関  
 係であるが、以下で透水係数と代表粒径の関係に関する  
 既存の提案式を利用して、細粒分含有率と透水係数の関  
 係を調べる。

透水係数と粒径の関係にはいくつかの提案があり<sup>11)</sup>、  
 多くは代表粒径を用いて透水係数と下式のような関係に  
 なっている。

$$k = C_p D_p^2 \quad (18)$$

ここに、 $k$ は透水係数、 $C_p$ は土の種類により定まる係数、  
 $D_p$ は土の代表粒径でHazenの式やTerzaghiの式では10%  
 粒径 $D_{10}$ が採用されている。式(18)の形をとるHazenの式  
 やTerzaghiの式は基本的に砂を対象とするものである。  
 Creagerの表は細礫から粗粒粘土までの細粒分を含む土  
 に対して20%粒径を用いて透水係数を示している。  
 Creagerの表の透水係数と代表粒径の関係を整理したと  
 ころ、図-4で示されるように透水係数と代表粒径の関  
 係を式(18)のような関係でほぼ表すことができる。このよ  
 うなことから、以下では細粒分を多く含む砂質土に対  
 しても式(18)のような関係が成立すると考える。

次に、粒径加積曲線は粒径と通過質量百分率の関係が  
 片対数のグラフ上で整理されるものであるが、この関係  
 が直線で表されると考えると、細粒分含有率と代表粒径  
 の関係は次式のように表される。

$$D_p = 0.0075 U_c^{(p-Fc)/50} \quad (19)$$

ここに、 $p$ は代表粒径を表す通過質量百分率で10%粒  
 径 $D_{10}$ であれば $p=10$ 、20%粒径 $D_{20}$ であれば $p=20$ であ  
 る。 $U_c$ は均等係数で、60%粒径 $D_{60}$ と10%粒径 $D_{10}$ の比  
 で定義されるものである。

式(18)、(19)から透水係数と細粒分含有率の関係は結局  
 次式の形で与えられることになる。

$$k = A_1 \cdot 10^{(A_2 \cdot Fc)} \quad (20)$$

$$A_1 = 0.0075^2 C_p U_c^{p/25} \quad (21)$$

$$A_2 = -(\log U_c) / 25 \quad (22)$$

以上から、地盤の排水性を透水係数の大きさと代表さ  
 せると、排水性は細粒分含有率に対して指数関数的に低

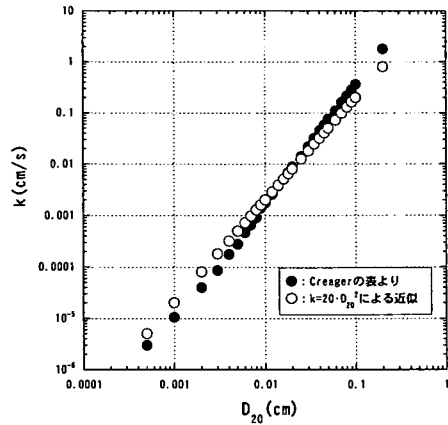


図-4 透水係数と代表粒径( $D_{20}$ )の関係

下することがわかる。なお、式(20)は $N$ 値予測の提案法  
 について細粒分含有率の影響を補正するために透水係数  
 と細粒分含有率の関係をだまかに調べたもので、透水係  
 数に焦点を置き定量的に議論する場合には十分な注意が  
 必要である。

#### (5) 細粒分含有率とパラメータの関係

前項までで締固め効果には地盤の排水性が影響し、  
 SCP工法の場合排水性を支配するのは透水係数であり、  
 透水係数と細粒分含有率が指数関数的な関係であることを  
 示した。ここでは、このような排水性に関する考察を  
 利用して、提案法(式(7)、(8)、(11)~(14))に細粒分含  
 有の影響を取り込む。

##### a) 排水性を反映させるパラメータ

提案法の基本となる式(1)にはパラメータ $a$ と $b$ の2種  
 類のパラメータがあり、パラメータ $a$ は最大間隙比での  
 累積せん断ひずみ増分と体積圧縮ひずみ増分の比で表さ  
 れ、累積せん断ひずみ増分に対する体積圧縮ひずみの増  
 加を規定するものである。パラメータ $b$ は累積せん断ひ  
 ずみが無限大となった場合の最終体積圧縮ひずみを規定  
 するものである。このようにパラメータ $a$ 、 $b$ のどちらも  
 せん断で発生する体積圧縮ひずみの絶対値に影響を与え  
 るが、ここでは排水条件の影響はパラメータ $a$ のみに反  
 映させる。このようにした理由は、式(1)で述べたように  
 体積圧縮ひずみ $\varepsilon^*$ は $1/b$ に漸近し、パラメータ $b$ は最終  
 体積圧縮ひずみ、すなわち最小間隙比と最大間隙比のみ  
 で規定されるべきものであると考えたからである。

以上のように、細粒分の含有による排水条件の影響を  
 パラメータ $a$ のみに反映させることとするが、これは結  
 局パラメータ $\kappa$ に反映させることになる。すなわち、式  
 (6)、(11)、(12)で示されるように、パラメータ $a$ は $\kappa$ と $\gamma^*$   
 に含ませることができ、 $\gamma^*$ は砂杭圧入前の原地盤 $N$ 値か  
 ら算定するので、 $\kappa$ を細粒分含有率と関係づけることに

なる。

### b) パラメータと細粒含有率の関係

図-5 は式(15)を用いて圧入率が  $F_v = 0.07 \sim 0.20$  の SCP 工法の実績から  $\kappa$  と細粒含有率の関係調べたものである。図-5 から、 $\kappa$  は細粒含有率が大きくなると、低下する傾向にあることがわかる。これは、式(1)、(3)において圧入率、すなわち累積せん断ひずみが同じでも、細粒含有率が高くなると排水性が低下して式(1)のパラメータ  $a$  が大きくなることに対応する。なお、図-5 の整理では圧入前後の換算  $N$  値が 30 を超えるものは除外した。この理由は、式(15)による  $\kappa$  の算定において、換算  $N$  値が 30 を超えた場合には  $\kappa$  が敏感に変化し、 $N$  値の測定誤差などが  $\kappa$  の値に大きく反映されるからである。また、圧入後の換算  $N$  値が圧入前より小さくなるものも除外している。

図-5 でパラメータ  $\kappa$  は細粒含有率に対して大きなばらつきはあるが、細粒含有率が高くなると低下する傾向が認められ、図-5 の  $\kappa$  と細粒含有率の関係から  $\kappa$  と細粒含有率関係の近似式を求める。ここで、図-5 の関係を近似する関数は、プロットのばらつきが大きいことから色々な関数が考えられるが、ここでは透水係数が細粒含有率に対して指数関数となっているので、 $\kappa$  と細粒含有率の関係も指数関数で近似することにした。

図-5 の実線が各プロットを指数関数で近似した曲線で、近似曲線は  $\kappa = 4.7 \cdot 10^{-0.0082F_c}$  となっている。曲線の相関係数はかなり低く 0.16 程度である。ここで、図-5 中の近似線はばらつきの大きなデータを近似したものであり相関係数も低く、このような精度を考慮して有効数字を丸めることにし、 $\kappa$  と細粒含有率の関係を下式で近似することとする。

$$\kappa = 5 \cdot 10^{-0.01F_c} \quad (23)$$

図-5 中の破線は式(23)の関係を示したもので、大きなばらつきはあるがプロットの傾向と対応している。

### 3. 実測データと提案予測法の比較

既に提案した砂杭圧入後の杭間  $N$  値を予測する手法に関して前章で細粒含有率による補正式を式(23)のように示した。ここで、細粒含有率による補正式を含めた提案予測法をまとめると以下のとおりである。

$$N_1 = C_M \left( \frac{\kappa F_v + \gamma_i}{c_1/c_2 + (\kappa F_v + \gamma_i)} \right)^2 \quad (11)$$

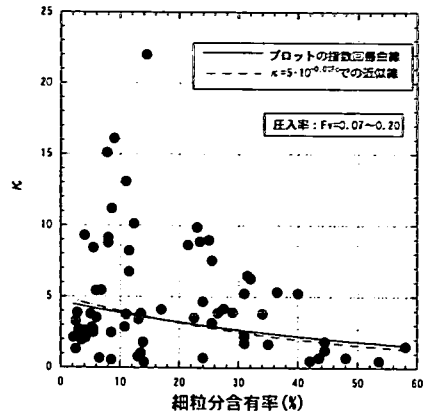


図-5  $\kappa$  と細粒含有率の関係

$$\gamma_i = \frac{\sqrt{N_0/C_M}}{(c_2/c_1)(1 - \sqrt{N_0/C_M})} \quad (12)$$

$$c_1 = e_{\max} - e_{\min} \quad (7)$$

$$c_2 = 1 + e_{\max} \quad (8)$$

$$e_{\max} = 0.02F_c + 1.0 \quad (13)$$

$$e_{\min} = 0.6 \quad (14)$$

$$\kappa = 5 \cdot 10^{-0.01F_c} \quad (23)$$

ここに、 $N_1$  は圧入後の杭間換算  $N$  値、 $N_0$  は圧入前の原地盤換算  $N$  値、 $C_M = (1/0.16)^2$ 、 $F_v$  は圧入率、 $F_c$  は細粒含有率(%)である。

#### (1) 原地盤 $N$ 値と杭間増分換算 $N$ 値の関係

原地盤換算  $N$  値と SCP 工法による砂杭圧入後の換算  $N$  値増分の関係を、圧入率  $F_v = 0.07, 0.079, 0.133, 0.15, 0.171, 0.196$  について実測値を●プロット、予測値を○プロットで図-6 に示す。また、図-6 の△プロットはパラメータ  $\kappa$  を  $\kappa = 5$  の一定値として細粒含有率の影響を受けないものとした場合のものである。実線、破線および点線は実測値および2種類の予測値と原地盤換算  $N$  値の関係を回帰分析し線形近似したものである。

図-6 から、実測値の●プロットは大きなばらつきはあるが、原地盤換算  $N$  値が大きくなると、増分換算  $N$  値は小さくなる傾向がある。予測値の○プロットもその傾向があり、予測値は実測値を定性的に説明できているといえ、提案予測法は原地盤換算  $N$  値の改良効果に及ぼす影響を反映できていることがわかる。定量的に個々のプロットについてみると予測値と実測値の間にかんがりの差のあるプロットがあるが、線形回帰線と比較すると圧入率  $F_v = 0.196$  を除けば実測値と予測値は近い位置にあり平均的には両者は良い対応である。また、細粒含有率の影響が考慮されていない△プロットは、○プロットより大きな増分換算  $N$  値を予測している。これは、△プロッ

トの算定における $\kappa$ の値が $\kappa=5$ と細粒含有率の影響を考慮した○プロットの $\kappa$ の上限值に対応しているからである。

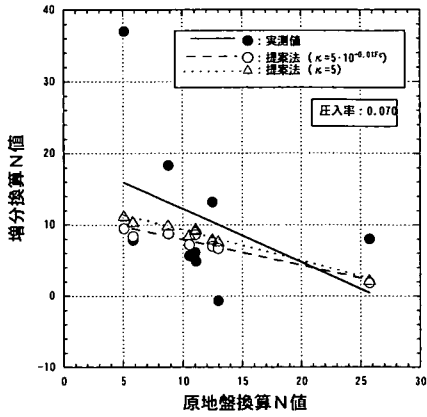


図-6(a) 増分換算 N 値と原地盤換算 N 値( $F_v=0.07$ )

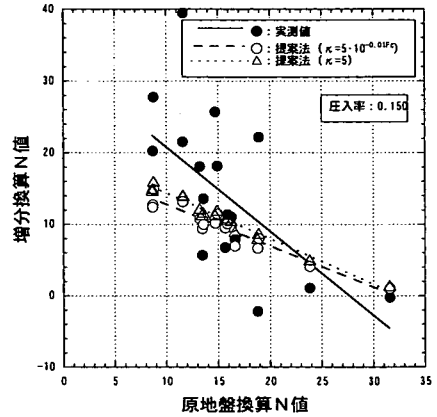


図-6(d) 増分換算 N 値と原地盤換算 N 値( $F_v=0.15$ )

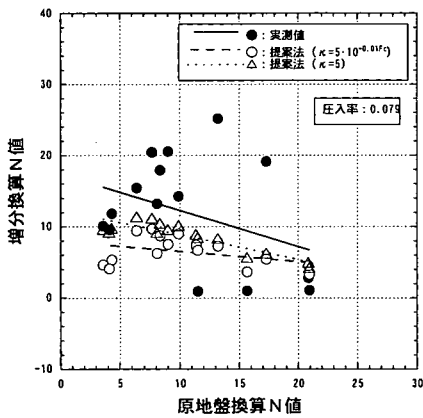


図-6(b) 増分換算 N 値と原地盤換算 N 値( $F_v=0.079$ )

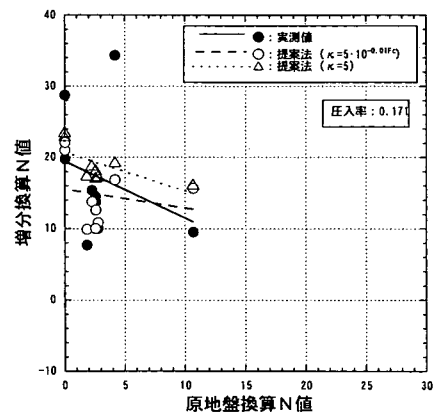


図-6(c) 増分換算 N 値と原地盤換算 N 値( $F_v=0.171$ )

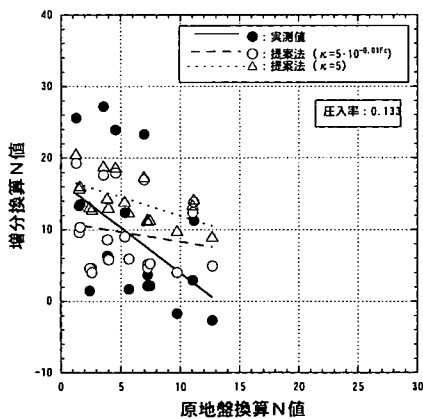


図-6(e) 増分換算 N 値と原地盤換算 N 値( $F_v=0.133$ )

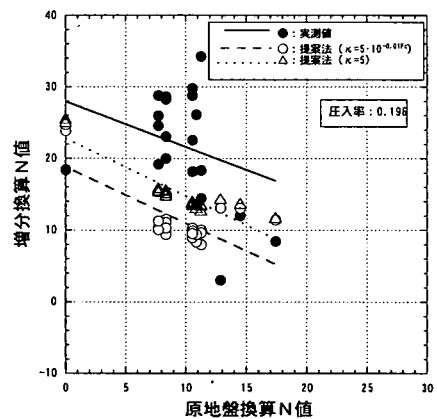


図-6(f) 増分換算 N 値と原地盤換算 N 値( $F_v=0.196$ )

(2) 細粒分含有率と杭間増分換算N値の関係

図-7は各圧入率ごとに、実測増分換算N値および提案法による予測増分換算N値と細粒分含有率の関係を片対数の関係で示したものである。また、図-7中の実線、破

線および点線は各プロットの近似線である。図-7から、実測増分換算N値と細粒分含有率の関係は、圧入率が0.196のプロット（線形回帰線では0.07, 0.196）を除いて、細粒分含有率が大きくなると増分換算N値は減少す

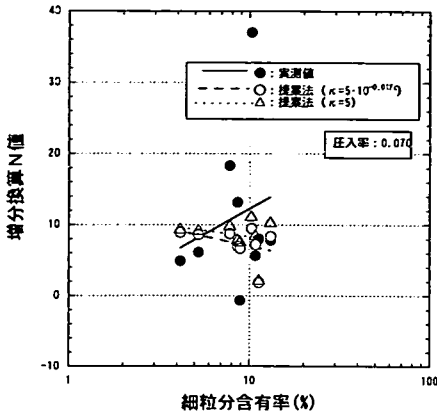


図-7(a) 増分換算N値と細粒分含有率( $F_v=0.07$ )

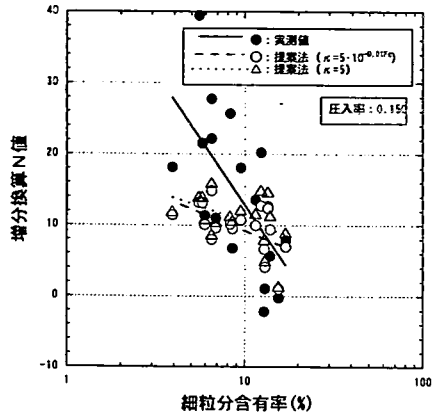


図-7(d) 増分換算N値と細粒分含有率( $F_v=0.15$ )

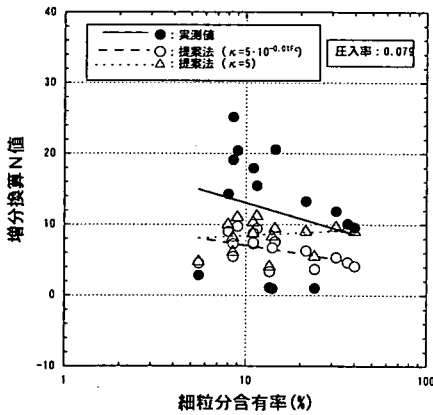


図-7(b) 増分換算N値と細粒分含有率( $F_v=0.079$ )

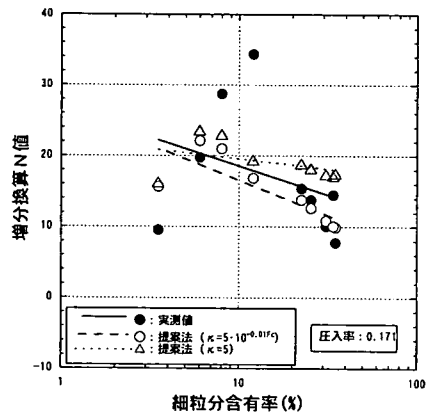


図-7(c) 増分換算N値と細粒分含有率( $F_v=0.171$ )

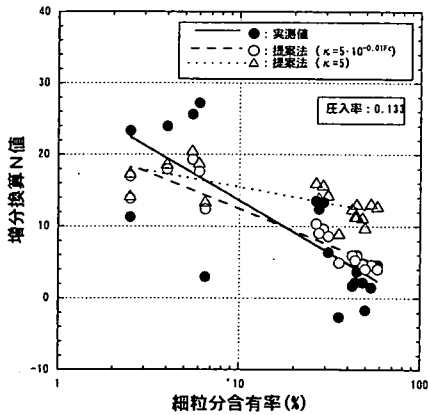


図-7(c) 増分換算N値と細粒分含有率( $F_v=0.133$ )

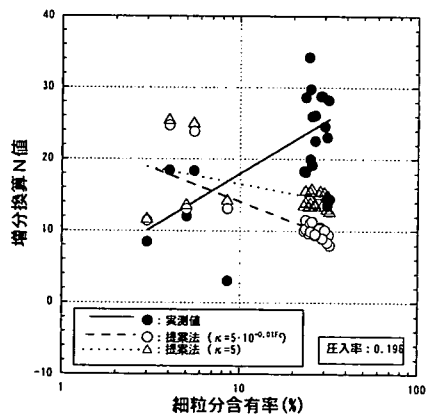


図-7(f) 増分換算N値と細粒分含有率( $F_v=0.196$ )



る傾向にある。提案法による予測値は、すべての圧入率において細粒分含有率が大きくなると増分換算N値は小さくなっていく傾向にある。増分換算N値の実測値(●)と提案法による予測値(○)を比較すると、(1)で述べたことと同様なことがいえ、定性的には両者は対応している。しかし、定量的には個々のプロットについてみると差が大きなものがあるといえる。

ここで、本論文で提案した式(23)による細粒分含有率の影響の考慮の結果についてみると、式(23)による考慮のない△プロットは○プロットより大きめの増分換算N値を予測している。この傾向は細粒分含有率が大きくなるほど強くなっている。次に、実測値の●プロットと比較すると、細粒分含有率の影響を考慮していない△プロットは細粒分含有率の大きなところで実測値と異なる傾向にあり、圧入率が0.196を除くと細粒分含有率の大きいところで過大な増分換算N値を予測する傾向があることがわかる。

### (3) 増分換算N値の実測値と予測値の比較

図-8は圧入率が $F_v = 0.07, 0.079, 0.133, 0.15, 0.171, 0.196$ の全部のデータについて実測の増分換算N値と予測値を比較したもので、●プロットは細粒分含有率の影響を考慮した提案法によるもの、○プロットはC法によるものである。また、実線は予測値と実測値が1:1の関係にあるライン、破線は●プロットを線形回帰したライン、点線は○プロットを線形回帰したラインである。

図-8の●プロットから、提案法による予測値と実測値の関係は1:1のラインを挟んで大きくばらついた関係にある。プロットの傾向は線形回帰した破線からわかるように、増分換算N値が大きくなるところでは予測値は実測値よりも小さな値になっている。これは、提案予測法で用いているMeyerhofの式において相対密度が $D_r = 100\%$ で換算N値が $N_{98} = 39$ になり、これが式(11)において換算

N値の上限となるために実測値のような大きな増分換算N値を予測しにくいからである。

図-8の提案法(●)とC法(○)を比較するとC法の方がばらつきは大きいことがわかる。各プロットの線形回帰線の相関係数は提案法では0.5、C法では0.1程度の値になっている。提案法の回帰線の勾配は1.0ではなくプロットに偏りが見られ、現状では偏りを解消することはできないが、提案法の方が相関係数は大きく予測精度は向上しているといえる。

### (4) 考察

以上、(1)~(3)で示したように、細粒分含有率の影響を考慮したことにより提案予測法の精度は向上した。また、実測値との対応にばらつき(誤差)が生じた原因は以下のことが考えられる。

①式(1)で示したような単純なモデルで砂杭圧入中の締固め過程を説明しきれない。例えば、提案法では砂杭圧入時における地盤内の拘束圧の変化などが無視されている。すなわち、実際にはせん断だけでなく、粘土の圧密のように有効応力の増加でも地盤は体積圧縮するが、提案法では砂質土についてはこのような拘束圧の変化による圧縮は少ないと考え無視されたものとなっている。

②N値と相対密度の関係が式(9)で示すMeyerhofの式のような簡単な関係ではない。例えば、同じ相対密度でもN値は側方土圧の影響を受け側方土圧が大きい方が大きなN値になると考えられる。砂杭圧入により静止土圧係数は変化するはずであるが、このような影響はMeyerhofの式には考慮されていない。

③ $\kappa$ は式(23)で示すように細粒分含有率のみの関数としているがそれ以外のパラメータの関数でもある。例えば、式(23)を求める展開で透水係数を細粒分含有率だけの関数としているが、均等係数なども影響を与えるはずである。また、提案モデルの基になっている「おわんモデル」ではせん断による圧縮性は排水条件だけでなく、せん断時の圧密圧力の大きさにも依存することが示されており、 $\kappa$ は有効上載圧の関数にもなっていると考えられる。

④実測N値自体に誤差がある。例えば本論文では圧入前後の土層で細粒分含有率が10%以内のデータのみを対象としたが、細粒分含有率が10%異なるだけでも増分N値には有為な差はある。

上記、4つ以外にも誤差の原因はあると考えられるが、いずれにしても提案法には①~③の誤差が少なくとも含まれている。しかし、SCP工法の設計実務においてN値と細粒分含有率しか取得しない現状を考慮すると提案法は妥当なものといえる。ただし、実務に用いる際は、実測値は提案法に対してばらつきがあるので、安全率などを考えてばらつきを考慮する必要があると考える。

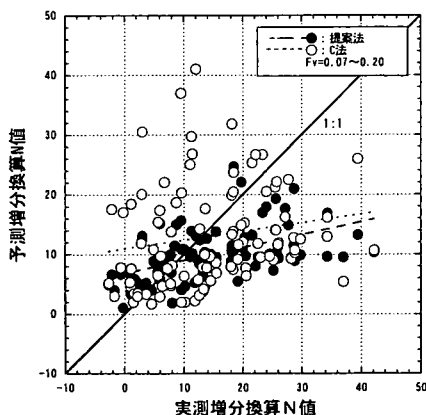


図-8 実測増分換算N値と予測増分換算N値

#### 4. 締固めに関する考察

ここでは、提案法を用いた締固めに関する簡単な考察として、細粒分含有率の増分  $N$  値に対する影響を調べ、また従来からC法で細粒分の影響を考慮するために用いられていた低減率 $\beta$ と比較する。さらに提案した  $N$  値増加の予測法の基本的部分は、土のせん断に関する力学特性、排水性に関する特性に基づいて誘導されている。したがって、予測法の各パラメータの同定では現場のSCP工法の実績を反映させてフィッティングなども行っているが、各パラメータは基本的には物理的な意味を持つものである。そこで、パラメータの持つ物理的な意味から、砂杭圧入による締固めに関する諸条件の影響を排水性に関連して調べる。

##### (1) 細粒分含有率の締固めに及ぼす影響

図-9 は細粒分含有率と低減率の関係を調べたものである。低減率とは細粒分の影響のない（細粒分含有率が  $F_c=0\%$ ）地盤の増分  $N$  値に対する各細粒分含有率での増分  $N$  値の比である。したがって、低減率の小さい方が細粒分の含有により増分  $N$  値は小さくなる。図-9 中の黒プロットは圧入率が  $F_v=0.1$  で原地盤換算  $N$  値が  $N_0=0, 5, 10, 15$  に対するもの、白抜きプロットは原地盤換算  $N$  値が  $N_0=5$  で圧入率が  $F_v=0.05, 0.10, 0.15, 0.20$  に対するものである。また、太実線はC法で用いられている低減率 $\beta$ と細粒分含有率の関係を示したものである。ただし、 $\beta$ は細粒分含有率が  $F_c=0\%$  に対しては求めることができず、算定式上では  $F_c=0\%$  で  $\beta=1.0$  にはならない。

図-9の黒プロットから、提案法によるものは若干ではあるが原地盤換算  $N$  値の小さい方が細粒分含有率に対する低減率が小さくなる傾向がある。図-9の白抜きプロットからは圧入率の小さい方が低減率は小さくなる傾向にあることがわかる。また、各プロットをC法の低減率 $\beta$ と比較すると提案法によるものは大きめの低減率であることがわかる。

##### (2) 砂杭圧入速度、圧入間隔の影響

排水性の観点からパラメータ $\kappa$ に影響を及ぼすのは細粒分含有率（透水係数）だけでなく、2章で示した排水係数  $C$  からわかるように荷速度、排水距離なども影響を与える。式(23)は通常のSCP工法による砂杭圧入速度のもとで集積されたデータから導かれたものであるが、ここでは式(23)を基に砂杭圧入速度が遅くなった場合の  $\kappa$  について調べ、砂杭圧入速度が締固め効果に及ぼす影響を考察する。

式(23)を以下のように書く。

$$\kappa = A_3 \cdot 10^{44 \cdot F_c} \quad (24)$$

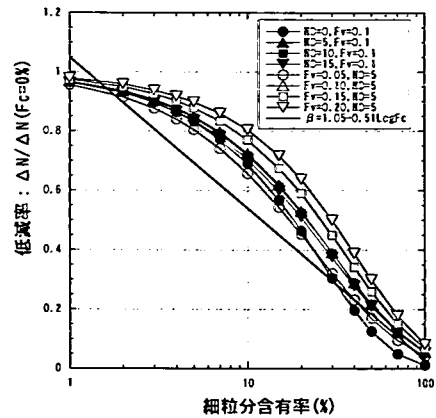


図-9 細粒分含有率と低減率の関係

式(24)と式(20)を連立させて細粒分含有率  $F_c$  を消去すると次式を得る。

$$\kappa = A_3 \cdot (k/A_1)^{44/42} \quad (25)$$

式(25)で透水係数  $k=k_0$  のときの  $\kappa$  を  $\kappa_{k_0}$ 、 $k=k_1$  のときの  $\kappa$  を  $\kappa_{k_1}$  としてその比をとると次式を得る。

$$\kappa_{k_1}/\kappa_{k_0} = (k_1/k_0)^{44/42} \quad (26)$$

式(26)は透水係数  $k$  の変化による  $\kappa$  の変化の大きさを表している。次に、式(17)から透水係数  $k$  と荷荷時間  $t$  は全く同じ影響を排水係数  $C$  におよぼすので、排水性の観点からは荷荷時間  $t$  は透水係数  $k$  と全く同じ影響をパラメータ  $\kappa$  におよぼすことになる。したがって、 $\kappa$  と荷荷時間  $t$  に関して式(26)と同様に以下の式を得ることができることになる。

$$\kappa_{t_1}/\kappa_{t_0} = (t_1/t_0)^{44/42} \quad (27)$$

ここに、 $\kappa_{t_0}$  は荷荷時間  $t_0$  の場合の  $\kappa$ 、 $\kappa_{t_1}$  は荷荷時間が  $t_1$  の場合の  $\kappa$  である。

ここで、砂杭の圧入速度が同じ場合には地盤に対する荷荷時間は圧入する砂杭の長さ  $L$  に比例して大きくなる。したがって、砂杭の長さ  $L$  が長くなると式(17)より排水係数  $C$  は大きくなり排水性が良いことになる。しかし、これは2章の(4)でも述べたが、SCP工法の場合は砂杭が半径方向に拡張されるのが地盤に対する荷荷になるので、杭長で正規化した単位長さ当たりの砂杭の圧入時間が荷荷時間となる。結局これは圧入速度の逆数となり、式(27)を次式に書き改める。

$$\kappa_{r_1}/\kappa_{r_0} = (r_0/r_1)^{44/42} \quad (28)$$

ここに、 $\kappa_{r_0}$  は砂杭圧入速度  $r_0$  の場合の  $\kappa$ 、 $\kappa_{r_1}$  は圧入速度  $r_1$  の場合の  $\kappa$  である。

式(28)のパラメータのうちパラメータ  $A_2$  は式(22)によると均等係数  $U_c$  に依存し、 $U_c=2$  の場合  $A_2=-0.01$ 、 $U_c=5$  で  $A_2=-0.03$ 、 $U_c=10$  で  $A_2=-0.04$ 、 $U_c=20$  で  $A_2=-0.05$ 、 $U_c=100$  で  $A_2=-0.08$  となるが、以下の考察では  $U_c=10$  を代表として  $A_2=-0.04$  として考察を行う。パラメータ  $A_4$  は式(23)から  $A_4=-0.01$  とする。したがって、式(28)において  $A_4/A_2=0.25$  とし、砂杭圧入速度の影響を以下で考察する。なお、 $A_4=-0.01$  を求めた図-5の実測値は様々な均等係数のデータが混ざっており、 $A_4$  はそれらを平均したものとなっていると考えられ  $A_4$  も本来的には均等係数に応じて変化する可能性がある。

通常の SCP 工法では 10m の砂杭を圧入するのに約 20 分かかるが、砂杭圧入時間を長く (砂杭圧入速度を遅く) して 2 倍の 40 分、10 倍の 200 分かけて施工を行った場合を考える。対象とする地盤の細粒分含有率は  $F_c=20\%$  の場合と  $F_c=60\%$  の場合とする。まず  $F_c=20\%$  の場合には、通常の SCP 工法では式(23)から  $\kappa=3.2$  となり、この場合の砂杭圧入速度を  $r_0$  として  $\kappa_{r_0}=3.2$  とする。これに対して砂杭圧入時間が 2 倍となった場合の砂杭圧入速度を  $r_1$  とすると  $r_0/r_1=2$  となる。 $A_4/A_2=0.25$  としているので式(28)から  $\kappa_{r_1}/\kappa_{r_0}=(2)^{0.25}=1.2$  となり  $\kappa_{r_1}=3.8$  となる。 $\kappa$  が 1.2 倍になるということは圧入率が見かけ上 1.2 倍のものと同等になり締め固め効率が向上したことになる。あるいは式(23)からは、細粒分含有率が  $F_c=20\%$  の地盤から  $F_c=12\%$  の地盤に見かけ上低下して同じ圧入率でも締め固め効率が向上したことになる。同様に時間を 10 倍かけた場合には、 $\kappa$  は  $10^{0.25}=1.8$  倍となり圧入率が見かけ上 1.8 倍、細粒分含有率が見かけ上  $F_c=5\%$  に低下したことになる。対象とする地盤が  $F_c=60\%$  であったとすると、時間が 2 倍の場合には細粒分含有率が  $F_c=52\%$  の地盤、時間が 10 倍の場合には  $F_c=35\%$  の地盤に見かけ上低下したことになる。以上から、砂杭圧入速度が締め固め効果に影響することがわかる。ここで示したことの定量的な精度については提案モデルが SCP 工法の実現象をかなり単純化していることから不明であるが、このような圧入速度の影響は浅岡らが有限要素解析によっても示しており<sup>12)</sup>、定性的には正しいと考える。また、これは、振動が伴わず累積せん断ひずみが小さいはずの静的な機構に基づく締め固め工法が、動的な締め固め工法 (通常の SCP 工法) とほぼ同じ改良効果やそれ以上の効果を発揮するという報告<sup>13)</sup>などにも整合する。

載荷時間と同様なことは式(17)から排水距離についても考えられ、例えば砂杭の圧入間隔などもパラメータ  $\kappa$  に影響を与えると考えられる。パーティカルドレーンと同様な考えで排水距離が砂杭の圧入間隔と等しいとすると、

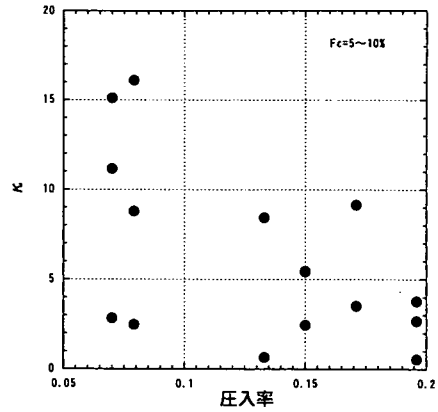


図-10  $\kappa$  と圧入率の関係

式(17)および前述の載荷時間の考え方から  $\kappa$  は砂杭圧入間隔の自乗の  $A_4/A_2$  乗に反比例することになり、このことは  $\kappa$  が圧入率  $F_v$  の  $A_4/A_2$  乗に比例して大きくなることを意味する。図-10 は  $\kappa$  と圧入率の関係を調べた一例である。図-10 では細粒分含有率の影響をできるだけ少なくするために、 $F_c=5\sim 10\%$  の土層のものを示している。ここで、仮に  $A_4/A_2=0.25$  であったとすると  $\kappa$  は圧入率  $F_v$  の 0.25 乗に比例して大きくなることになるが、図-10 からはそのような傾向は明白にはみられない。この原因は、図-10 のデータのばらつきが大きいこと以外に、砂杭の透水係数と地盤の透水係数がかなり近い値であるために砂杭の排水層としての効果が完全でないことや、さらにこれに対して図-10 の各データにおいて層厚や層の位置が異なっており排水長に関して土層構成の影響が大きくなっている可能性などが考えられる。

## 5. 結論

既に提案した締め固め砂杭工法による杭間 N 値増加に関する予測法について、細粒分含有率の影響に関する考察を実測値に基づいて行った。また、砂杭圧入中によるせん断ともなう負のダイレイタンスの発生量に着目して細粒分含有率の影響を提案法に取り込み、以下のような結果を得た。

- ① 細粒分含有率が大きくなると、提案モデルのパラメータである  $\kappa$  が小さくなり締め固め効率が低下していた。
- ② 排水性が低下すると同じ累積せん断ひずみでも発生する負のダイレイタンスが小さくなる。この特性と細粒分含有率と透水係数の関係からパラメータ  $\kappa$  の細粒分含有率に関する補正式を提案した。
- ③ 細粒分含有率による補正式を用いることにより実測値をより精度良く説明できるようになった。

- ④提案モデルから既存のC法で用いられている細粒分による低減率との比較を行ったところ、C法による低減率よりも大きめの低減率を与えていた。
- ⑤提案モデルを用いた考察より砂杭圧入速度を遅くすると締固め効率が良くなることが推定された。

## 6. おわりに

提案法は砂杭圧入を地盤内にせん断ひずみを蓄積させるものであると捉えたもので、基本的には土の力学挙動をせん断変形によるダイレイタンスの側面から考察して得たものである。しかしながら、砂杭圧入にはせん断以外に地盤の拘束圧が大きくなり地盤を圧縮させる要素もあるが、砂質地盤の場合には拘束圧の変化の圧縮への影響は小さいと考えて提案法では無視されている。また、実地盤は特性の異なる土層の互層状態になっている。さらには、施工方法も多種多様と考えられる。提案法はこのような実現象を単純化したものである。このようなことから提案法は、実測値のばらつき等を表現できなかったと考える。締固め砂杭工法は十分な実績があるが、設計法については未解明な点が多数残されているのが現状といえる。提案法を用いる際には以上のようなことをふまえて、安全率などを考慮する必要がある。

謝辞：本論文をまとめるにあたり、国土交通省の各地方整備局と北海道開発局、ならびに内閣府沖縄総合事務局にご協力をいただいた。関係各位に謝意を表します。

### 参考文献

- 1) 地盤工学会：液状化対策の調査設計から施工まで，pp. 187-193, 1993. (2002. 6. 26 受付)
- 2) 山崎浩之，森川嘉之，小池二三勝：サンドコンパクションパイル工法による砂地盤のN値増加に関する考察，土木学会論文集，第708号/Ⅲ-59, pp. 199-210, 2002.
- 3) 山崎浩之，森川嘉之，小池二三勝：サンドコンパクションパイル工法による砂質地盤の締固めの設計法に関する考察，港湾空港技術研究所報告，第41巻，第2号，pp. 93-118, 2002.
- 4) 吉見吉昭：砂の乱さない試料の液状化抵抗～N値～相対密度関係，土と基礎，Vol. 42, No. 4, pp. 63-67, 1994.
- 5) Meyerhof, G. G.: Discussion of Session 1, *Proc. of 4th ICSMFE*, London, Vol. 3, p. 110, 1957.
- 6) 福武毅芳，松岡 元：任意方向単純せん断におけるダイレイタンスの統一的解釈，土木学会論文集，第412号/Ⅲ-12, pp. 143-151, 1989.
- 7) 平間邦興：相対密度の適応に関する2・3の私見，砂の相対密度と工学的性質に関するシンポジウム発表論文集，土質工学会，pp. 53-56, 1981.
- 8) 水野恭男，末松直幹，奥山一典：細粒分を含む砂質地盤におけるサンドコンパクションパイル工法の設計法，土と基礎，Vol. 35, No. 5, pp. 21-26, 1987.
- 9) 沼田淳紀，嶋本栄治，染谷 昇，国生剛治：細粒な土の相対密度（定義方法），第36回地盤工学研究発表会講演集，pp. 2193-2194, 2001.
- 10) 福武毅芳：土の多方向繰返しせん断特性を考慮した地盤・構造物系の三次元液状化解析に関する研究，名古屋工業大学学位申請論文，pp. 44-47, 1997.
- 11) 地盤工学会：土質工学ハンドブック，pp. 67-70, 1989.
- 12) 浅岡 顕，中野正樹，野田利弘，水野和憲，高稲敏浩，野津光夫，竹内秀克：水～土連成解析を用いた砂杭直径による砂質地盤の締固め効果の解明，第34回地盤工学研究発表会講演集，pp. 1129-1130, 1999.
- 13) 山崎浩之，中里高密：静的締固め杭工法の現地実験，材料，第49巻，第3号，pp. 352-355, 2000.

## STUDY ON EFFECT OF FINES CONTENT AND DRAINAGE CHARACTERISTICS OF SANDY DEPOSITS ON SAND COMPACTION PILE METHOD

Hiroyuki YAMAZAKI, Yoshiyuki MORIKAWA and Fumikatsu KOIKE

The sand compaction pile method is the most frequently used methods as a countermeasure against liquefaction of sandy deposits. The authors have already proposed a method to predict the SPT N-value after compaction. It is, however, found that the method does not appropriately consider the effect of fines content of soil deposits on the compaction efficiency. This paper describes the correction of the proposed method for the fines content effect. The correction is done on the basis of the relationship between the fines content and the drainage characteristics of soils, and the drainage effect on the dilatancy behaviour of soils during cyclic loading. And it also describes the effect of the driving rate of the sand pile on the compaction efficiency by considering the effect of the driving rate on the drainage of the soil deposits.