

# 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

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)

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、港湾・空港において行われた同工法の液状化対策としての実績を集め、圧入率と改良後の杭間N値を調べ、既存の設計法の妥当性を検討した。その結果、実測値は圧入率が同一であれば改良前の原地盤N値が小さい方がN値の増加が大きくなっていったが、既存の設計法はこの傾向を逆に評価することがわかった。そこで、同工法の改良メカニズムについて繰返しせん断効果を考慮した方法を導入し、圧入率設定のための新しい方法を提案した。

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

## 1. はじめに

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)すなわち打設間隔が決定される。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ある<sup>1)</sup>。

本論文では最近約5カ年において港湾、空港で実施されたSCP工法のデータを基に、C法による設計法と実測値を比較しながらSCP工法による地盤の締固め特性を調べる。さらに、C法の精度を検証してその問題点を明らかにし、新たなN値増加の推定法を提案する。

## 2. 既存の設計法

SCP工法の設計法には、A法、B法、C法と呼ばれる、

3つの方法がある<sup>1)</sup>。A法は、締固め前後のN値の関係を示したチャートを用いるもので、チャートは圧入率をパラメータに示されている<sup>2)</sup>。したがって、原地盤N値と圧入率が与えられれば改良後N値が推定できる。ただし、同チャートは細粒分含有率20%以下の地盤に対してSCP工法を実施した過去のデータを集積したものであるため、細粒分含有率が大きくなる場合には適用できない。また、N値の有効上載圧依存性などは無視されている。B法は、小川らの提案したもので<sup>3)</sup>、Gibbs-Holtzの間隙比-相対密度-N値-有効上載圧の関係<sup>4)</sup>と、小川らの示した最大間隙比 $e_{max}$ 、最小間隙比 $e_{min}$ の推定図を用いている。これに打設された砂杭と等しい体積だけ原地盤の間隙は小さくなるという仮定を置くことにより、原地盤N値と圧入率が与えられれば改良後N値が推定されるものである。なお、B法では有効上載圧は考慮できるが、細粒分含有率の影響をN値の増加に反映できない。C法は水野らの提案したもので<sup>5)</sup>、基本的にはB法と同じで、MeyerhofのN値と相対密度の関係式<sup>6)</sup>、平間の実験結果<sup>7)</sup>に基づき提案された $e_{max}$ 、 $e_{min}$ の推定式を利用して原地盤N値と圧入率から改良後のN値を推定するものである。また、C法では細粒分含有率によりN値の増加を低減させるパラメータがあり、細粒分含有率によるN値の補正が可能である。このようなことから、C法が最も汎用性

が高く、本論文における実測値との比較はC法を対象に行う。なお、山本らは、C法の砂杭と原地盤の体積圧縮の関係(B法と同じ)について、細粒分含有率の影響を考慮した新しい設計法を提案している<sup>9)</sup>。

### 3. SCP工法による原地盤N値の増加およびC法との比較

我が国の港湾・空港において、国の直轄事業として実施されたSCP工法による砂質地盤の地盤改良について、改良前N値、改良後N値、圧入率、および細粒分含有率のデータを集積した。対象とした期間はおよそ1995年からの5カ年である。集積したデータの内、本論文で対象とするのはSCP施工の事前と事後の土質調査でN値と細粒分含有率の両方のデータが揃っていた25地点のものとした。さらに、事前・事後の粒度試験で細粒分含有率の差が10%以内で、かつ、細粒分含有率が約30%以下の土層を対象とした。細粒分含有率が30%以下のものを対象とした理由は、SCP工法の効果がN値の増加として現れるのは、一般的に細粒分含有率が30%以下の土層だからである。

#### (1) 改良前の原地盤N値と増分N値の関係

改良前の原地盤の換算N値と換算N値の増分の関係、圧入率 $F_v = 0.07, 0.079, 0.133, 0.15, 0.171, 0.196$ について図-1に示す。また、図-1にはC法で予測された増分換算N値の関係も合わせて示す。なお、実線および一点鎖線は実測値およびC法による予測値と原地盤N値の関係を一次関数で回帰分析し線形近似したものである。ここで、換算N値は有効鉛直圧力が $98\text{kN/m}^2$ に補正されたN値で、次式で表される。

$$N_1 = \frac{167}{\sigma'_v + 69} N \quad (1)$$

ここに、 $N_1$ は換算N値、 $\sigma'_v$ は有効鉛直圧力( $\text{kN/m}^2$ )、 $N$ は計測された標準貫入試験N値である。

図-1から、プロットに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、実測の増分換算N値は小さくなる傾向があることがわかる。しかし、C法による増分換算N値の予測値は、換算N値が大きくなると値が大きくなっており、実測と反対の傾向になっている。したがって、原地盤の換算N値を変数とした場合には、C法は実測値を定性的に予測できないといえる。

#### (2) 細粒分含有率と増分N値の関係

図-2は各圧入率ごとに、細粒分含有率と実測の増分換

算N値およびC法による予測の増分換算N値の関係を示したものである。また、図-2中の実線と一点鎖線は図-1と同様な近似線である。図-2から、実測の増分換算N値と細粒分含有率の関係は、圧入率が0.07と0.196の2つを除いて、細粒分含有率が大きくなると増分換算N値は減少する傾向にある。C法による予測は、細粒分含有率が大きくなるとすべての圧入率において増分換算N値が小さくなる結果になっている。増分換算N値の実測値とC法による予測値を比較すると、圧入率が0.15の場合を除き、C法による予測値の方が細粒分含有率に対して低減が大きいことがわかる。

#### (3) 圧入率と増分N値の関係

図-3は圧入率と増分換算N値の関係を図-1、図-2の実測値の近似線を基に調べたもので、図-3(a)は図-1の各実測の近似線について原地盤換算N値が0, 5, 10, 15の場合の増分換算N値を圧入率に対して整理したものである。図-3(b)は、図-2の近似線について細粒分含有率が0, 10, 20, 30%の場合の増分換算N値を圧入率に対して整理したものである。また、図-3には線形回帰による各プロットの近似線を示す。

図-3(a), (b)の各プロットは、図-3(b)の細粒分含有率が30%のものを除くと、いずれの場合も圧入率とともに増分換算N値が大きくなる関係がある。

増分換算N値と圧入率の関係に及ぼす原地盤N値の影響については、図-3(a)から原地盤N値が大きい方が同じ圧入率に対して増分換算N値は小さくなることがわかる。細粒分含有率の影響については、細粒分含有率が大きくなると同一の圧入率に対して増分換算N値は小さくなる。また、細粒分含有率が大きくなると、近似線の勾配は小さくなっている。このことから細粒分含有率が大きい場合には圧入率を上げても原地盤のN値増加に対する効果は少ないといえる。

図-4は圧入率と増分換算N値の関係を図-1のC法による予測値の近似線を基に調べたもので、図-4(a)は原地盤換算N値が0, 5, 10, 15の場合の増分換算N値、図-4(b)は細粒分含有率が0, 10, 20, 30%の場合の増分換算N値を、それぞれ圧入率に対して整理したものである。図-4(a)を実測値の図-3(a)と比較すると、圧入率が大きくなると増分換算N値は大きくなりこの点については同じ結果であるが、原地盤換算N値との関係においては全く反対の結果になっている。すなわち、図-3(a)に示した実測値では、原地盤換算N値が大きい方が増分換算N値はグラフの下位に位置していたが、図-4(a)に示したC法による予測値では、原地盤換算N値が大きくなるほどグラフの上位に位置している。したがって、C法は圧入前の原地盤N値が改良効果に及ぼす影響を反映しているとはいえず、このことは(1)で述べたようにC法の抱える問題

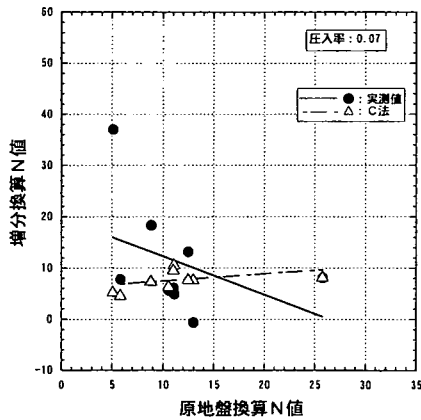


図-1 (a) 原地盤換算 N 値と増分換算 N 値 ( $F_v = 0.07$ )

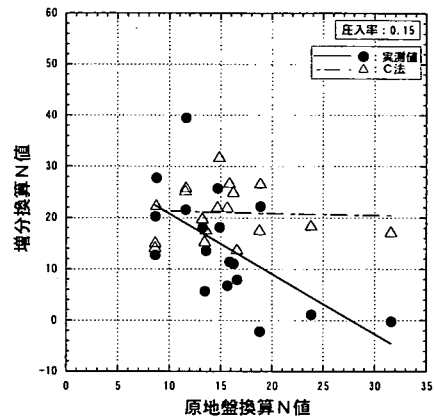


図-1 (d) 原地盤換算 N 値と増分換算 N 値 ( $F_v = 0.15$ )

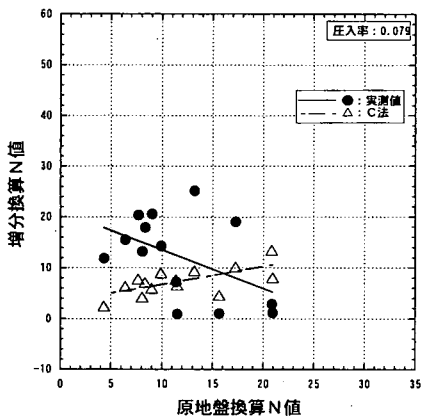


図-1 (b) 原地盤換算 N 値と増分換算 N 値 ( $F_v = 0.079$ )

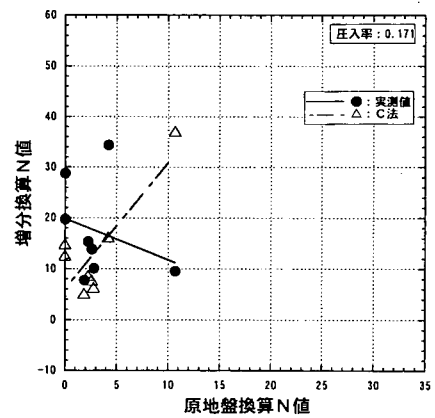


図-1 (e) 原地盤換算 N 値と増分換算 N 値 ( $F_v = 0.171$ )

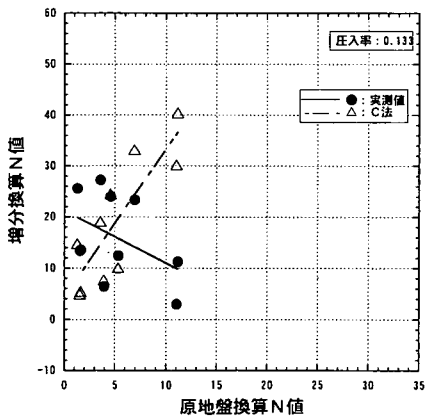


図-1 (c) 原地盤換算 N 値と増分換算 N 値 ( $F_v = 0.133$ )

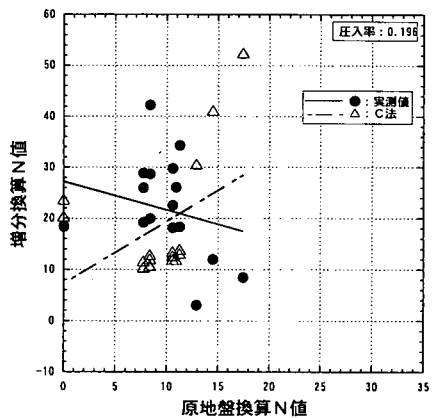


図-1 (f) 原地盤換算 N 値と増分換算 N 値 ( $F_v = 0.196$ )

点である。

図-4(b)を実測値の図-3(b)と比較すると、どちらも細粒分含有率が大きくなると増分換算N値はグラフの下位に位置しており、同じ傾向になっている。ただし、予測値の図-4(b)の方が、細粒分含有率の違いによる影響が増分

換算 N 値に大きく現れている。なお、予測値の図-4(b)で増分換算 N 値がゼロ以下になっているが、これは図-2のプロットの近似線をそのまま使用したことによる。

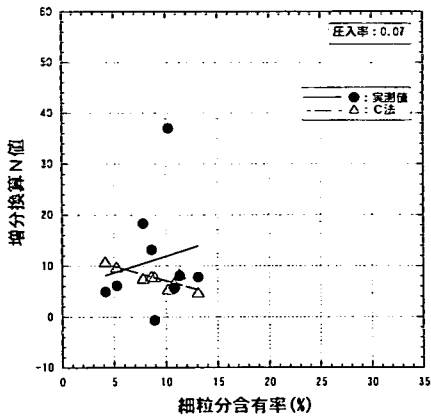


図-2 (a) 細粒分含有率と増分換算 N 値 ( $F_v = 0.07$ )

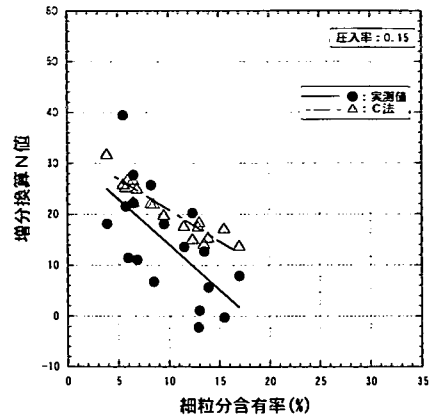


図-2 (d) 細粒分含有率と増分換算 N 値 ( $F_v = 0.15$ )

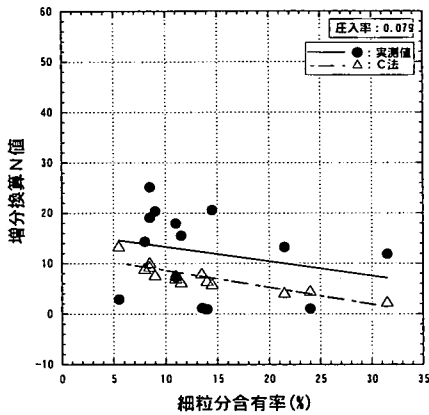


図-2 (b) 細粒分含有率と増分換算 N 値 ( $F_v = 0.079$ )

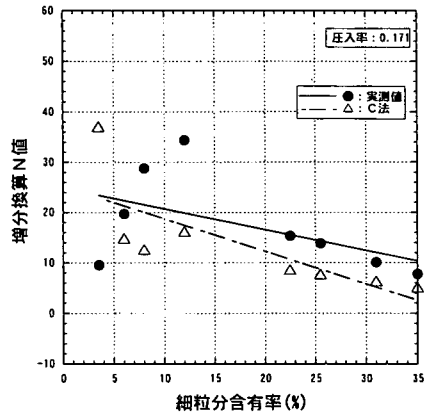


図-2 (e) 細粒分含有率と増分換算 N 値 ( $F_v = 0.171$ )

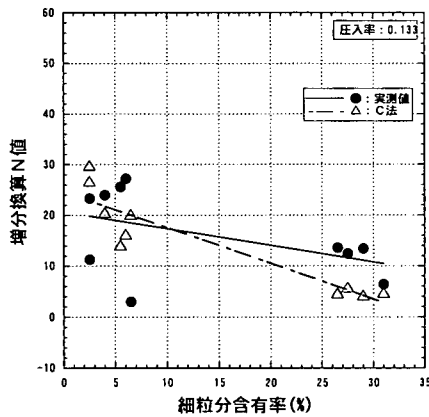


図-2 (c) 細粒分含有率と増分換算 N 値 ( $F_v = 0.133$ )

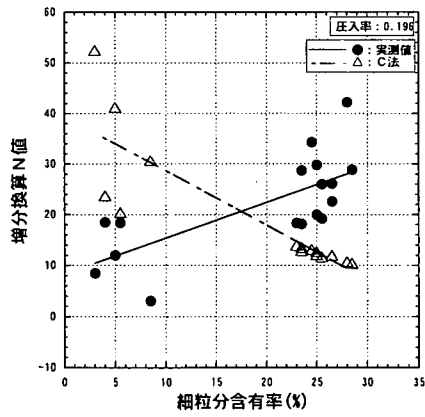


図-2 (f) 細粒分含有率と増分換算 N 値 ( $F_v = 0.196$ )

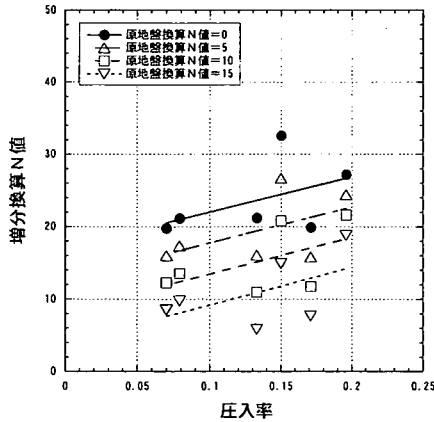


図-3(a) 増分換算N値と圧入率の関係に及ぼす原地盤換算N値の影響(実測値)

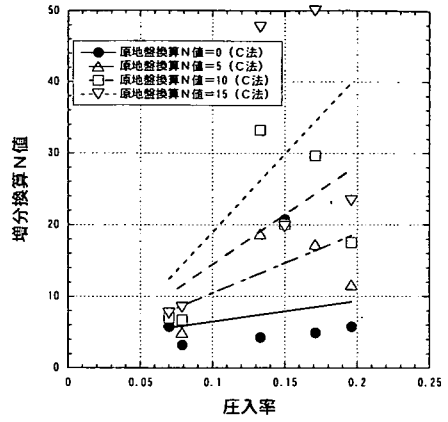


図-4(a) 増分換算N値と圧入率の関係に及ぼす原地盤換算N値の影響(C法)

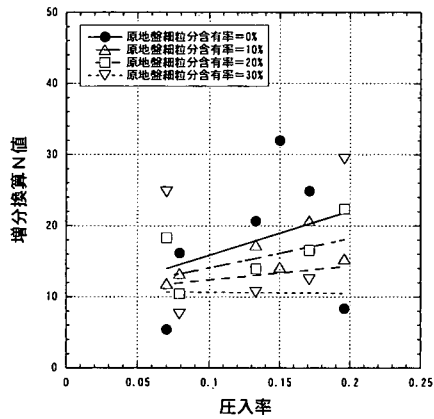


図-3(b) 増分換算N値と圧入率の関係に及ぼす細粒分含有率の影響(実測値)

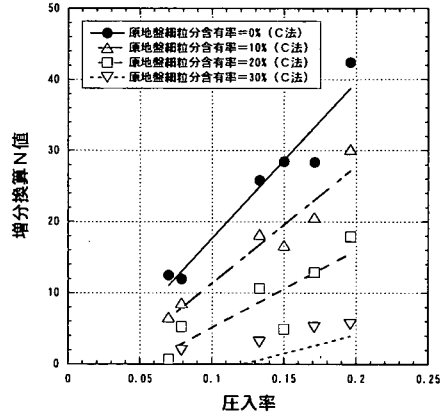


図-4(b) 増分換算N値と圧入率の関係に及ぼす細粒分含有率の影響(C法)

#### 4. SCP工法による原地盤N値の増加の新しい予測法の提案

前章でSCP工法の設計で採用されているC法には原地盤N値の改良効果への影響が的確に反映されていないことを示した。これは、以下で述べるように、C法で仮定している締固めのメカニズムに原因があり、このことはB法についてもいえることである。

C法あるいはB法では、砂杭圧入による杭間地盤の締固めメカニズムは、図-5(a)に示すように、圧入された砂杭体積と等しい体積が杭間において圧縮すると考えている。これは、砂杭圧入による地盤の密度増加は原地盤密度(N値)に依存せず、圧入率のみに依存することになる。また、相対密度とN値の関係は図-5(b)のような関係を用いている。これは、同じ密度増加に対しては原地盤N値が大きい方が大きなN値の増分を意味している。このようなことから、原地盤換算N値に対して換算N値の増分が実測値と全く逆の結果になったと説明

できる。そこで、締固めのメカニズムを再考し、また、N値と相対密度の関係についても最近の研究成果を取り入れて、SCP工法の設計のための改良後N値の予測手法について新しい方法を提案する。

##### (1) 改良メカニズム

Tsukamoto ら<sup>9)</sup>は砂杭圧入による杭間の体積圧縮について、負のダイレイタンスに着目し、静的締固め杭の締固め効果とそのメカニズムの検討を行っている。本論文で提案する杭間の体積圧縮のメカニズムにおいても、Tsukamoto ら<sup>9)</sup>と同様に杭間の土の体積圧縮を繰返しせん断による負のダイレイタンスの蓄積に起因すると考える。すなわち、ここでの考え方は杭の圧入を、地盤の繰返しせん断現象としてとらえている。このようなせん断現象と考えることは、SCP施工中に地下水が噴出する液状化に似た現象が観察されることと整合する。ここでは、以下に示す福武の提案した「おわんモデル」をSCP工法下の繰返しせん断モデルに利用する。

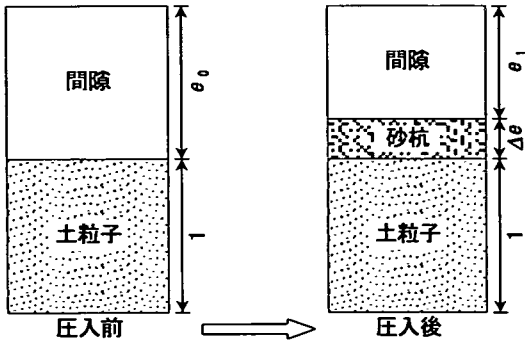


図-5(a) 既往の方法の圧縮メカニズム

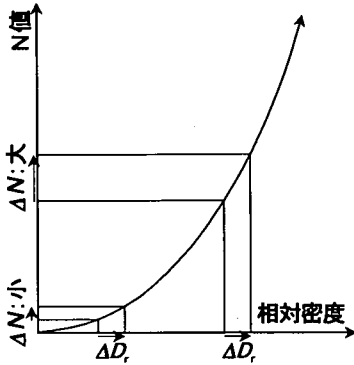


図-5(b) 既往の方法で用いられている相対密度とN値の関係

福武は繰返しせん断にともなう土の体積変化をモデル化した「おわんモデル」を提案している<sup>10)</sup>。「おわんモデル」では、図-6および式(2)、(3)で示されるように、ダイレイタンシーが、繰返しせん断ひずみ成分に起因した正のダイレイタンシーと、累積せん断ひずみ成分に起因した負のダイレイタンシーの重ね合わせとして表されている。

$$\varepsilon_z^s = \varepsilon_r + \varepsilon_G \quad (2)$$

$$= A\Gamma^B + \frac{G^*}{C + DG^*} \quad (3)$$

ここに、 $\Gamma$ は繰返しせん断ひずみ、 $G^*$ は累積せん断ひずみ、 $\varepsilon_z^s$ はダイレイタンシーによる体積ひずみ、 $\varepsilon_r$ は繰返しせん断ひずみ $\Gamma$ による正のダイレイタンシー、 $\varepsilon_G$ は累積せん断ひずみ $G^*$ による負のダイレイタンシー、 $A, B, C, D$ は係数である。

繰返しせん断ひずみによるダイレイタンシー $\varepsilon_r$ は、載荷-除荷の繰返し中に体積膨張-圧縮を繰返す成分で、大きな残留体積ひずみとはならないものである。累積せん断ひずみ $G^*$ によるダイレイタンシー $\varepsilon_G$ は、 $G^*$ とともに

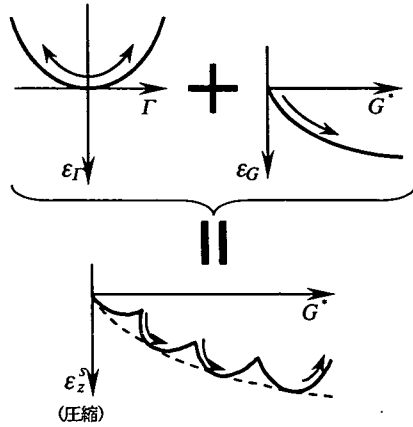


図-6 「おわんモデル」によるダイレイタンシー $\varepsilon_z^s$ の発生メカニズムの概念<sup>10)</sup>

に体積圧縮として蓄積される成分で、これが大きな体積圧縮となる。

ここで、式(3)は土要素に対する式であるので、式(3)をSCP工法の設計に用いるためには、有限要素法などの数値計算が必要となる。数値計算は時間がかかり、パラメータの設定など煩雑な業務となるので実務には好ましくない。そこで、厳密に「おわんモデル」を利用することは考えず、以下のように式(3)の形を利用したマクロな方法を用いる。まず、式(3)を次式のように書き改める。

$$\varepsilon^* = \frac{\gamma^*}{a + b\gamma^*} \quad (4)$$

ここに、 $\varepsilon^*$ は杭間のN値計測位置での体積圧縮ひずみ(負のダイレイタンシー)、 $\gamma^*$ 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。

式(4)では式(3)の繰返しせん断によるダイレイタンシーを無視したが、これは大きな体積圧縮の累積には影響しないと考えたからである。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。杭間の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ものではなく、式(4)を満たす杭間のせん断履歴の大きさを表す量である。砂杭による圧入が振動等を含めた外力になるので、杭間の累積せん断ひずみは圧入される砂杭体積の関数として表してよく、ここでは下式のように圧入率に比例する量と考える。

$$\gamma^* = f(F_v) \quad (5)$$

$$= \kappa_0 F_v + \gamma_0^* \quad (6)$$

ここに、 $\kappa_0$  は比例係数、 $F_v$  は圧入率、 $\gamma_{10}^*$  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。

式(6)に $\gamma_{10}^*$ を置いたのは、式(4)において体積圧縮ひずみ $\varepsilon^*$ を最大間隙比でゼロとしたことにより、砂杭の圧入率 $F_v$ がゼロでも杭間(原地盤)の体積圧縮ひずみは必ずしもゼロではなく、圧入前の $\gamma^*$ に初期値が必要だからである。このようなことから、 $\gamma_{10}^*$ には原地盤に体積圧縮を起こさせた過去の荷重履歴などが反映される。

以上のように、砂杭圧入により杭間がせん断され、それに伴う負のダイレイタンスにより地盤が体積圧縮するという圧縮メカニズムを仮定し、以下で砂杭圧入によるN値の増加予測手法を提案する。

## (2) 新しい予測法

前節(1)で述べた体積圧縮のメカニズムを用いて、SCP工法によるN値増加の予測法を展開する。予測法は、①N値と相対密度の関係、②圧入による体積圧縮に伴う相対密度の変化の予測、③最大間隙比と最小間隙比の推定、という3つからなっている。

### a) N値と相対密度の関係

C法ではN値と相対密度の関係はMeyerhofの式を用いていたが、ここでは最近の知見を取り入れて、以下の式を用いる。

$$N_1 = A_1(D_r - D_{r0}) \quad (7)$$

ここに、 $N_1$ は換算N値、 $A_1$ は定数で50程度の値、 $D_r$ は相対密度、 $D_{r0}$ は $N_1$ がゼロの場合の相対密度で0.3程度の値である。ここで、式(7)は、吉見がN値と相対密度について整理した関係<sup>11)</sup>を、相対密度の上限を $D_r = 1.0$ として線形近似したものである。吉見の整理したデータは、細粒分含有率が6%以下の砂地盤から凍結サンプリングで採取した供試体から求めた相対密度とN値の関係を調べたものである。したがって、Meyerhofの式の基になったデータより、原地盤のN値と相対密度の関係としては精度が高いといえる。

### b) 圧入率と杭間N値の関係の提案

相対密度 $D_r$ は下式で表される。

$$D_r = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \quad (8)$$

ここに、 $e$ は間隙比である。

ここで、式(8)の $e_{\max}$ と $e_{\min}$ はC法の平間の実験結果を利用した推定式を用いて細粒分含有率から算定することとする。ただし、最小間隙比については最近の沼田らの研究成果<sup>12)</sup>を活用し、細粒分含有率によらないものとす

る。したがって、最大間隙比と最小間隙比は次式で算定される。

$$e_{\max} = 0.02F_c + 1.0 \quad (9)$$

$$e_{\min} = 0.6 \quad (10)$$

ここに、 $F_c$ は細粒分含有率%である。

式(4)、(6)および、 $\varepsilon^* = \Delta e / (1 + e_{\max}) = (e_{\max} - e) / (1 + e_{\max})$ の関係から、式(8)は次式になる。

$$D_r = \frac{c_2}{c_1} \frac{\kappa_0 F_v + \gamma_{10}^*}{a + b(\kappa_0 F_v + \gamma_{10}^*)} \quad (11)$$

$$c_1 = e_{\max} - e_{\min} \quad (12)$$

$$c_2 = 1 + e_{\max} \quad (13)$$

式(11)で累積せん断ひずみ( $\gamma^* = \kappa_0 F_v + \gamma_{10}^*$ )が無限大の時に相対密度は $D_r = 1.0$ となるので、定数 $b$ は下式になる。

$$b = \frac{c_2}{c_1} \quad (14)$$

定数 $a$ は、式(4)から累積せん断ひずみがゼロの時の累積せん断ひずみ増分と体積ひずみ増分の比である。このような定数 $a$ の決定、さらに、 $\kappa_0$ の決定、 $\gamma_{10}^*$ の算定について、以下のように式(11)を展開する。

式(7)と式(11)から、換算N値と圧入率の関係は次式になる。

$$N_1 = A_1 \left( \frac{c_2}{c_1} \frac{\kappa_0 F_v + \gamma_{10}^*}{a + b(\kappa_0 F_v + \gamma_{10}^*)} - D_{r0} \right) \quad (15)$$

ここで、式(15)の定数 $b$ に式(14)を代入し、式(15)の括弧内の第1項の分子と分母を定数 $a$ で除すると、式(15)は下式に変形され、 $a$ を決定する必要はなくなる。

$$N_1 = A_1 \left( \frac{c_2}{c_1} \frac{\kappa F_v + \gamma_i^*}{1 + (c_2/c_1)(\kappa F_v + \gamma_i^*)} - D_{r0} \right) \quad (16)$$

ここに、 $\kappa = \kappa_0/a$ 、 $\gamma_i^* = \gamma_{10}^*/a$ である。

$\gamma_i^*$ は式(16)に圧入前の原地盤換算N値を代入し下式で算定される。

$$\gamma_i^* = \frac{N_{1i}/A_1 + D_{r0}}{(c_2/c_1)\{1 - (N_{1i}/A_1 + D_{r0})\}} \quad (17)$$

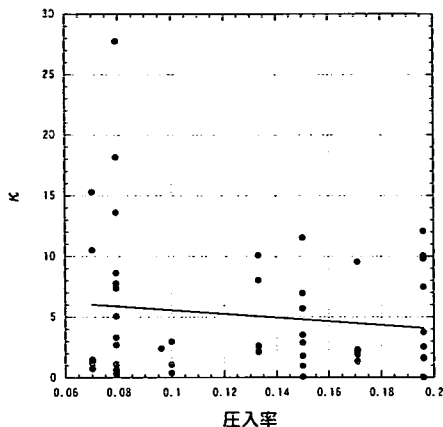


図-7  $\kappa$ と圧入率の関係

ここに、 $N_{1i}$ は圧入前の原地盤換算N値である。

以上から、定数 $\kappa$ が定まれば、圧入率、圧入前の原地盤換算N値、地盤の細粒分含有率を与えることにより、圧入後の杭間換算N値が、式(9)、(10)、(12)、(13)、(16)、(17)から求まることになる。

$\kappa$ は圧入率と杭間の累積せん断ひずみを関係づける係数であるが、これの決定は以下のように、過去のSCP工法の実績を基に決定する。

式(16)、(17)から $\kappa$ は下式で表される。

$$\kappa = \frac{(c_2/c_1)\gamma_i^* \{1/(N_{1i}/A_1 + D_{r0}) - 1\}}{(c_2/c_1)F_v \{1 - 1/(N_{1i}/A_1 + D_{r0})\}} \quad (18)$$

ここで、 $A_1 = 50$ 、 $D_{r0} = 0.3$ とする。この場合、圧入後の換算N値が35を超えるデータについては、相対密度が1.0を超えるので式(16)が適用範囲を超え、 $\kappa$ が負の値をとる。また、換算N値が35に近い場合には、式(18)の分母が小さな値となり、分子に含まれる実測値のパラッキが大きくなる値となって反映される。そこで、圧入後の換算N値が30以下のものを対象に、3章で示した現地のデータを用いて、圧入率と $\kappa$ の関係を表(17)、(18)により調べた。また、圧入後の換算N値が圧入前のものより小さなデータも除外した。

図-7は $\kappa$ と圧入率の関係で、実線は線形回帰したものである。図-7から $\kappa$ は圧入率が大きくなると小さくなる傾向がある。しかし、圧入率が0.079のものに $\kappa$ が15以上のプロットが特に多くあり、これらのプロットを無視すると、 $\kappa$ は1~15の範囲で圧入率にあまり関係なくばらついており、平均的には $\kappa$ は5程度の値である。 $\kappa$ がばらつくのは、地盤の細粒分含有率、排水性や施工の違いなどが影響しているためと考えられる。したがって、 $\kappa$ は正確には、圧入率も含めて細粒分含有率などの関数

になると考えられるが、ここではこのような要因を無視し、 $\kappa$ の値として5を提案しておく。

### c) 提案手法の確認

提案手法をまとめると、圧入前の原地盤換算N値： $N_{1i}$ 、細粒分含有率： $F_v$ (%)、圧入率： $F_v$ が与えられれば、下式で圧入後の換算N値が算定される。

$$N_1 = A_1 \left( \frac{c_2}{c_1} \frac{\kappa F_v + \gamma_i^*}{1 + (c_2/c_1)(\kappa F_v + \gamma_i^*)} - D_{r0} \right) \quad (16)$$

$$\gamma_i^* = \frac{N_{1i}/A_1 + D_{r0}}{(c_2/c_1)\{1 - (N_{1i}/A_1 + D_{r0})\}} \quad (17)$$

$$c_1 = e_{\max} - e_{\min} \quad (12)$$

$$c_2 = 1 + e_{\max} \quad (13)$$

$$e_{\max} = 0.02F_c + 1.0 \quad (9)$$

$$e_{\min} = 0.6 \quad (10)$$

ここに、 $A_1 = 50$ 、 $D_{r0} = 0.3$ 、 $\kappa = 5$ とする。誘導過程で用いたデータから、適用範囲は細粒分含有率が30%以下、圧入率は0.07~0.20である。この範囲を超えるものについては注意が必要である。

図-8は3章で示した増分換算N値と原地盤換算N値関係の実測値と提案手法による予測値の比較、図-9は増分換算N値と細粒分含有率関係についての比較である。破線と点線は $\kappa$ を1と15とした場合の結果を一次関数で回帰分析して近似したものである。

図-8から、提案手法は原地盤換算N値が増加すると、増分換算N値が減少しており、実測値の傾向を良く表している。 $\kappa$ の感度については、 $\kappa$ が1から15に変化すると増分換算N値は20程度大きくなっている。また、 $\kappa$ が1から15の増分換算N値の変化は圧入率が0.196と0.15のものを除き実測値のパラッキの範囲にほぼ対応している。 $\kappa$ が5のものは $\kappa$ が1と15のものの平均的なところにあり、実測値の近似線との対応も良く、 $\kappa = 5$ として提案式を用いれば、実測値をほぼ説明できるといえる。

図-9の比較では、3章で述べたことと同様に、圧入率0.07、0.079と0.196のものは、線形回帰したラインの勾配が実測値と提案値で逆になっており傾向が異なる。その他の圧入率については、提案手法は細粒分の増加に対する増分換算N値の低減が過小評価されている。

ここで、図-8において圧入率が0.196の実測値に対しては、提案手法( $\kappa = 5$ )は増分換算N値を特に過小評価している。これらの実測値の多くは圧入後の換算N値(増分換算N値と原地盤換算N値の和)が30を超えている。これに対し提案手法の相対密度と換算N値を関連づける式(7)には換算N値の上限值 $N_1 = 35$ があり、このことが過小評価の一つの原因である。これについては、今後のN値と相対密度関係のデータの蓄積を待つ必要があるが、



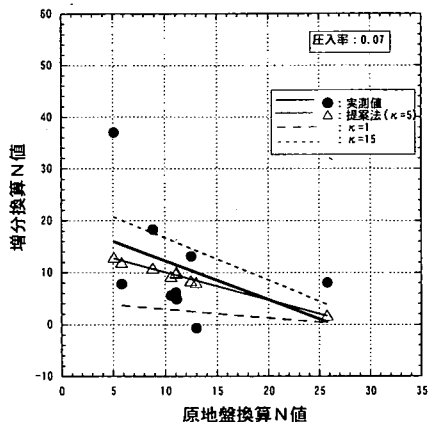


図-8(a) 原地盤換算N値と増分換算N値 ( $F_v = 0.07$ )

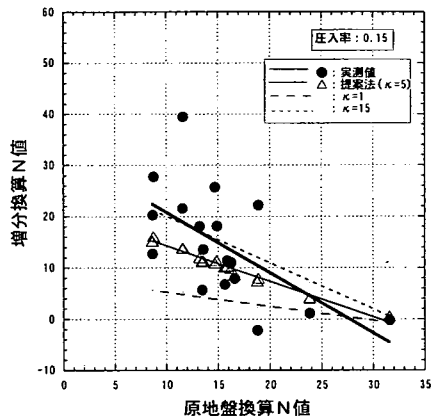


図-8(d) 原地盤換算N値と増分換算N値 ( $F_v = 0.15$ )

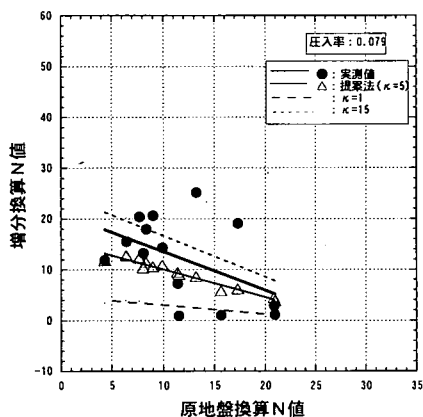


図-8(b) 原地盤換算N値と増分換算N値 ( $F_v = 0.079$ )

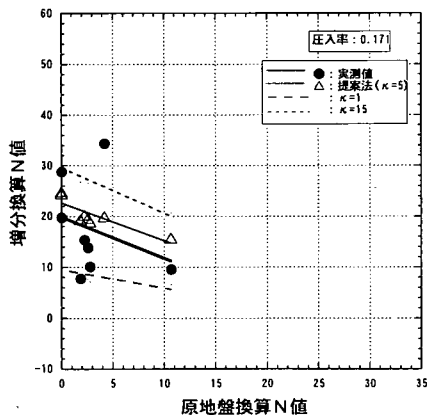


図-8(e) 原地盤換算N値と増分換算N値 ( $F_v = 0.171$ )

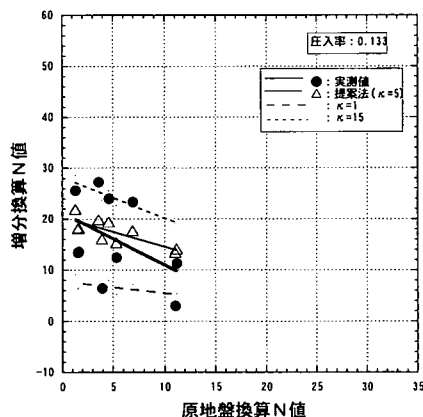


図-8(c) 原地盤換算N値と増分換算N値 ( $F_v = 0.133$ )

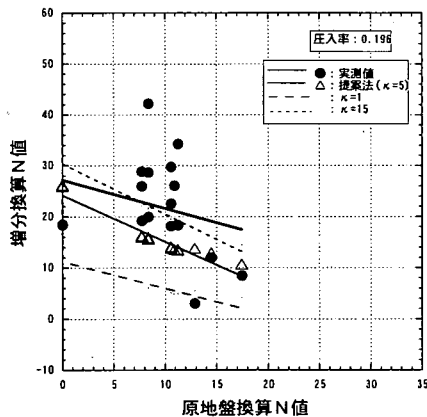


図-8(f) 原地盤換算N値と増分換算N値 ( $F_v = 0.196$ )

実務上安全側の評価につながるので特に大きな問題とは考えない。

また、図-8において圧入率が0.171のものについては、提案手法 ( $\kappa = 5$ ) は増分換算N値を特に過大評価している。これは、図-9の比較において述べたように、提案手法は細粒分の増加に対する増分換算N値の低減が過小評

価されているからである。

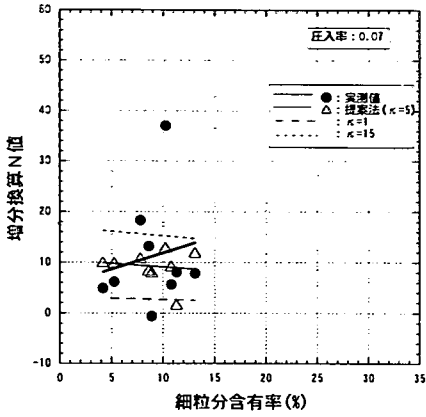


図-9(a) 細粒分含有率と増分換算N値 ( $F_v = 0.07$ )

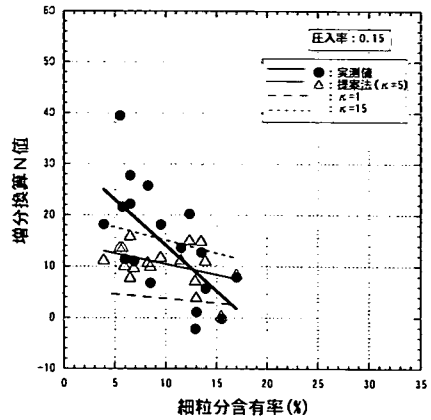


図-9(d) 細粒分含有率と増分換算N値 ( $F_v = 0.15$ )

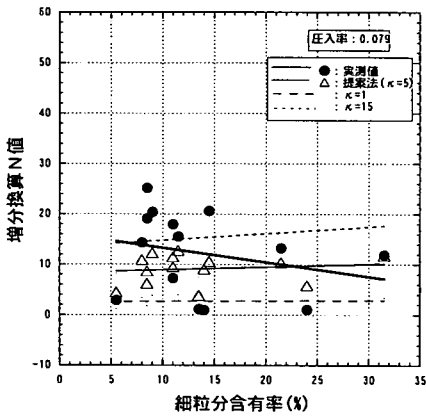


図-9(b) 細粒分含有率と増分換算N値 ( $F_v = 0.079$ )

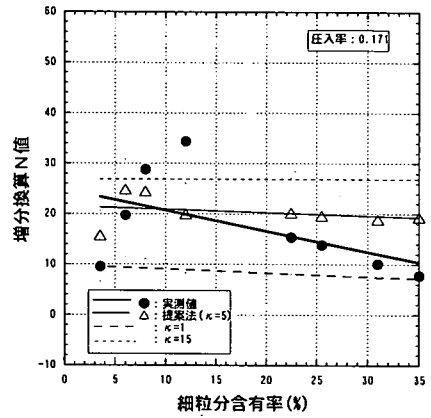


図-9(e) 細粒分含有率と増分換算N値 ( $F_v = 0.171$ )

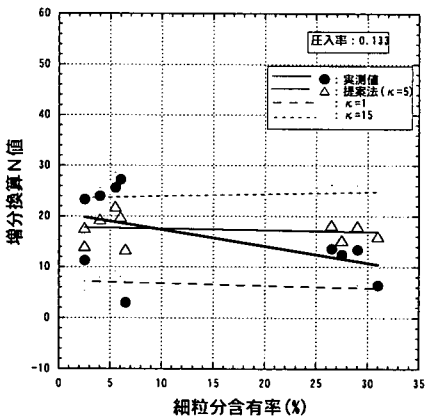


図-9(c) 細粒分含有率と増分換算N値 ( $F_v = 0.133$ )

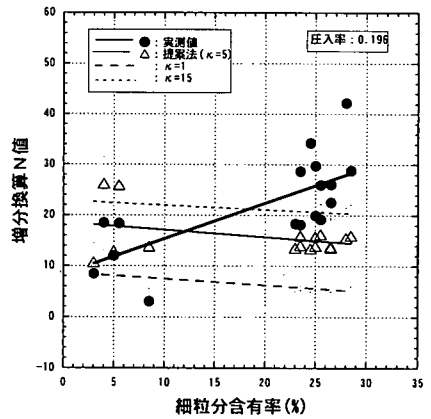


図-9(f) 細粒分含有率と増分換算N値 ( $F_v = 0.196$ )

## 5. 結論

サンドコンパクションパイル工法による締固めが行われた細粒分含有率が約30%以下の砂質土地盤において、杭間N値の増加について現地のデータを集めて検討を行い、以下のような結論を得た。

- ①原地盤の換算N値が大きくなると、砂杭圧入後の換算N値の増加は小さくなる。これは、既往のN値増加の予測手法(C法)と全く逆の傾向であった。
- ②細粒分含有率が大きくなると、換算N値の増加は低減されていた。これは、C法による予測と整合性はあったが、C法による低減は実測値よりも過大な傾向であった。
- ③細粒分含有率が大きくなるにしたがい、N値の増加に対する圧入率増加の効果は少なくなる。
- ④サンドコンパクション工法による砂杭間の締固めに関して、新しい締固めのメカニズムを提案した。提案したメカニズムに基づき、新たにN値増加に関する予測手法を提案した。
- ⑤提案した手法は、実測値の傾向を説明していたが、細粒分含有率の影響を過小評価するものであった。

## 6. おわりに

サンドコンパクションパイル工法について、その実績と使用されている設計法について検討を行ったところ、実測値と設計手法から得られるN値の増加に大きな違いが見られた。このため、砂杭圧入による締固めのメカニズムから検討し、新たなN値増加の予測手法を提案した。提案した予測手法は、その誘導過程において実際の現象をかなり単純化している。また、これまでの他の研究者の実測データに基づいている。そのため、新たな知見が得られると当然改良されるべきである。特に、細粒分含有率の影響については、その影響をメカニズムに遡って定量化し、予測法に反映する必要があると考える。また、提案手法を実設計に利用する際には、N値のバラツキを考慮することも必要と考えられ、このようなことも今後検討していかねばならない。さらに、ここで提案したメカニズムは砂杭圧入を地盤内にせん断による負のダイレイタンシーを起こさせると捉えたものである。したがって、地盤内にモルタル、打込み杭などを圧入させる工法に対しても適用できると考えられる。

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.
- 2) 不動産建設研究室：コンポーザーシステムデザインマニュアル，pp. 11-18, 1971.
- 3) 小川充郎，石堂 稔：砂質土に対するパイロ・コンポーザー工法の適用について—砂の内部締固め設計・施工の考察—，土と基礎，Vol. 13, No. 2, pp. 77-82, 1965.
- 4) Gibbs, H. J. and Holz, W. G.: Research on Determining the Density of Sand by Spoon Penetration Test, *Proc. of 4th ICSMFE*, London, Vol. 1, pp. 35-39, 1957.
- 5) 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.
- 6) Meyerhof, G. G.: Discussion of Session 1, *Proc. of 4th ICSMFE*, London, Vol. 3, p. 110, 1957.
- 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) 山本 実，原田健二，野津光夫：締固め砂杭工法を用いた緩い砂地盤の液状化対策の新しい設計方法，土と基礎，Vol. 48, No. 11, pp. 17-20, 2000.
- 9) Tsukamoto, Y., Ishihara, K., Yamamoto, M., Harada, K. and Yabe, H.: Soil Densification Due to Static Sand Pile Installation for Liquefaction Remediation, *Soils and Foundations*, Vol. 40, No. 2, pp. 9-20, 2000.
- 10) 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シーの統一的解釈，土木学会論文集，第412号/Ⅲ-12, pp. 143-151, 1989.
- 11) 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.
- 12) 沼田淳紀，嶋本栄治，染谷 昇，国生剛治：細粒土の相対密度（定義方法），第36回地盤工学研究発表会講演集，pp. 2193-2194, 2001.

(2001. 10. 22 受付)

# STUDY ON PREDICTION OF SPT N-VALUE OF SANDY DEPOSITS IMPROVED BY 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 design of the method, which is the determination of the replacement ratio with sand piles, is conducted by using the SPT N-value and fines content of a soil layer and the targeted N-value. This paper describes the relationship between the replacement ratios and the increments of N-values in between sand piles based on the field data obtained in ports and an airport in Japan. And the effectiveness of a conventional method for the determination of the replacement ratio is discussed with the field data. It is found that the N-value before compaction affects the increment of the N-value, and that the influence is not considered in the conventional method. A new method to predict the increment of N-values by compaction is proposed on the basis of the cyclic shearing mechanism of soil in between sand piles during compaction. The new method is validated with the field data.