

独立行政法人港湾空港技術研究所

# 港湾空港技術研究所 報告

---

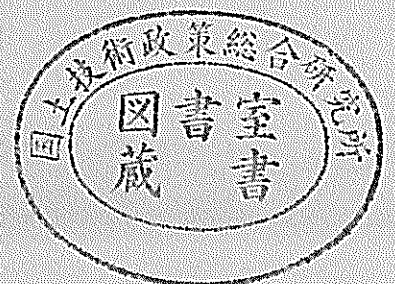
REPORT OF  
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH  
INSTITUTE

---

VOL.44 NO.3 September 2005

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

INDEPENDENT ADMINISTRATIVE INSTITUTION,  
PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE



# 港湾空港技術研究所報告(REPORT OF PARI)

第44巻 第3号 (Vol.44, No.3), 2005年9月 (September 2005)

## 目 次 (CONTENTS)

1. 短繊維補強コンクリートの港湾構造物への適用性評価に関する研究  
.....伊藤 始・横田 弘・岩波光保..... 3  
(Evaluation on the Applicability of PVA Short Fiber Reinforced Concrete to Harbor Structures  
.....Hajime ITO, Hiroshi YOKOTA, Mitsuyasu IWANAMI)
  
2. 港湾コンクリート構造物における塩害環境の定量的評価手法に関する検討  
.....山路 徹・中野 松二・濱田 秀則.....39  
(Study on the estimation method of surface chloride ion content in port concrete structures  
.....Toru YAMAJI, Shoji NAKANO, Hidenori HAMADA)
  
3. 細粒分含有率を考慮した砂質地盤の締固めの設計法の提案  
.....山崎 浩之・永野 賢次.....77  
(Design method for Compaction of Sandy Deposits Considering Fines Content  
.....Hiroyuki YAMAZAKI, Kenji NAGANO)

## 細粒分含有率を考慮した砂質地盤の締固めの設計法の提案

山崎 浩之\*  
永野 賢次\*\*

### 要 旨

著者らはサンドコンパクションパイル工法（以下 SCP 工法）による杭間 N 値の予測法について、せん断による負のダイレイタンスに着目した予測法を既に提案している。しかし、同予測法には締固め効果に及ぼす細粒分含有率の影響が考慮されておらず、実務への適用性が低かった。そこで、本報告では、実務への適用性を高めるために締固め効果に及ぼす細粒分含有率の影響を考察し、予測法の修正を行い、細粒分含有率の影響を考慮した杭間 N 値の予測法を新たに提案している。新しく提案した方法で必要となるデータは、従来から実務設計で用いられているのと同じく、圧入前の N 値、細粒分含有率、圧入率の 3 つである。また、提案した方法の SCP 工法以外の締固め工法へ適用性の確認、および静止土圧係数  $K_0$  の増加の影響を取り入れた方法も誘導し  $K_0$  の影響について考察した。主要な結果は以下のとおりである。

- (1) 修正した新しい方法は圧入後の実測 N 値の増加が細粒分含有率の増加とともに低下する傾向を表現できており、予測の精度が向上しより実用的になった。
- (2) 修正した新しい方法は実測 N 値の増加を過小評価する傾向にあり、これは  $K_0$  の増加が評価されていないことが原因の一つであった。N 値のばらつきや安全側を考慮すると通常は  $K_0$  の影響を無視した新提案式を用いた方が良い。
- (3) 修正した新しい方法が、SCP 工法とは異なる施工方法である静的圧入締固め工法への適用が可能であることが確認できた。

キーワード：サンドコンパクションパイル工法，N 値，締固め，細粒分含有率，圧入率

---

\* 地盤・構造部動土質研究室長

\*\* 地盤・構造部動土質研究室研究員

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 港湾空港技術研究所

電話：046-844-5054 Fax：046-844-0618 e-mail:yamazaki@pari.go.jp

## Design method for Compaction of Sandy Deposits Considering Fines Content

Hiroyuki YAMAZAKI\*  
Kenji NAGANO\*\*

### Synopsis

Authors had already proposed a prediction method of N-values between sand piles in the sandy deposits improved by the sand compaction pile method had been proposed by authors. However, the prediction method is not suitable for practice because it does not consider the influence of fines contents on the compaction efficiency. In this study, the prediction method is modified by taking the influence of fines contents into consideration. The modified method necessitates N-values before compaction, fines contents, and replacement ratio of sand piles to the improved deposits. The effect of the earth pressure coefficient at rest is studied on the increase of the N-value after compaction by introducing the earth pressure coefficient into the modified method. The main results are:

- 1) The prediction by the modified method shows the same tendency as the observation that the increment of the N-value by compaction decreases with the fines contents. The newly modified method is more applicable to the practical use for the sand compaction pile method.
- 2) The predicted N-value tends to be smaller than the observed one. This tendency attributes to the increase of the earth pressure coefficient due to the compaction, which is not considered in the modified method. The increase of the earth pressure coefficient should be considered. For the practical use, however, it is more preferable to apply the modified model without the consideration of increase of the earth pressure coefficient for the conservative prediction.
- 3) It is verified that the modified method is applicable to the static compaction method using mortar injection as well as the sand compaction pile method.

**Key Words:** sand compaction pile method, N-value, compaction, fines content, replacement ratio

---

\* Head of Soil Dynamics Division, Geotechnical and Structural Engineering Department

\*\* Member, Soil Dynamics Division, Geotechnical and Structural Engineering Department  
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan  
Phone : +81-46-8445054 Fax : +81-46-8440618 e-mail:yamazaki@pari.go.jp

## 目 次

要 旨 .....	77
1. まえがき .....	81
2. 既提案法 .....	81
2.1 既提案法と誘導過程 .....	81
2.2 既提案法による増分N値と細粒分含有率の関係 .....	83
3. 細粒分含有率の影響を考慮した予測式の提案 .....	83
3.1 締固め効果におよぼす細粒分含有率の影響 .....	83
3.2 排水性におよぼす細粒分含有率の影響 .....	84
3.3 細粒分含有率と予測式のパラメータの関係 .....	86
3.4 実測データと予測値の比較 .....	86
3.5 予測式による締固め効果に関する細粒分の影響の考察 .....	87
4. 静止土圧係数の影響の検討 .....	90
4.1 N値, 相対密度, 静止土圧係数, 圧入率の関係に関する既往の研究 .....	90
4.2 圧入による $K_0$ 値の変化を考慮した予測式 .....	91
5. 考察 .....	92
5.1 細粒分含有率の影響を考慮した予測式についての考察 .....	93
5.2 他の締固め工法への予測式の適用性に関する考察 .....	95
6. 結論 .....	96
7. あとがき .....	97
参考文献 .....	97

## 1. まえがき

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では、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。圧入率の設定方法には、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>。著者らは既にこれらの方法に代わるものとして、港湾、空港で実施されたSCP工法のデータを基に、新しい締固めメカニズムに基づく圧入率の設定法を提案した<sup>2),3)</sup>。しかしながら、提案した方法には締固め効率に及ぼす細粒分含有率の影響が考慮されておらず、そのため、実務への適用性に問題があった。本報告では、既に提案した方法に対して、締固め効率に及ぼす細粒分含有率の影響を考慮できるように汎用性を高め、実務への適用性を高めている。また、N値におよぼす静止土圧係数 $K_0$ 値の影響<sup>4)</sup>も取り入れ、圧入後N値の予測結果を考察している<sup>5)</sup>。さらには、SCP工法以外の他の締固め工法への適用性も検討している。

## 2. 既提案法

### 2.1 既提案法と誘導過程

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、下式のように、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。

$$\Delta D_r = f_1(F_r) \quad (1)$$

$$D_r = f_2(N) \quad (2)$$

ここに、 $D_r$ は相対密度、 $N$ は標準貫入試験N値、 $F_r$ は圧入率、 $f_1$ は圧入率と相対密度、 $f_2$ はN値と相対密度の関係を規定する関数である。ただし、 $f_1$ 、 $f_2$ にはN値、 $F_r$ 以外に、細粒分含有率や、有効上載圧なども影響因子として含まれる。

上式において、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値以外で適切にあれば、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<sup>6)</sup>に基づいた関係を利用した場合と、Meyerhofの式<sup>7)</sup>を用いた場合のもの2種類である。両者は、原地盤換算N値が小さなおとこで予測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。本報告では相対密度と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。

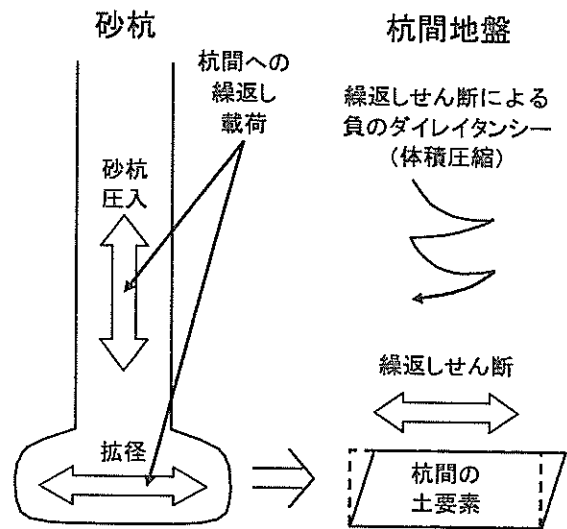


図-1 締固めメカニズムの模式図

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>8)</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。

$$\varepsilon^* = \frac{\gamma^*}{a + b \cdot \gamma^*} \quad (3)$$

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）、 $\gamma^*$ 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も得られるが、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。

$$\begin{aligned} \gamma^* &= f(F_v) & (4) \\ &= \kappa_0 \cdot F_v + \gamma_{10}^* & (5) \end{aligned}$$

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。なお、式(5)で $\gamma_{10}^*$ を置いた理由は式(3)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。

$$D_r = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \quad (6)$$

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(3)の体積ひずみ $\varepsilon^*$ は次式で与えられる。

$$\varepsilon^* = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \quad (7)$$

式(3)、(5)、(7)から、式(6)は次式になる。

$$D_r = \frac{\kappa \cdot F_v + \gamma_{10}^*}{c_1/c_2 + (\kappa \cdot F_v + \gamma_{10}^*)} \quad (8)$$

$$c_1 = e_{\max} - e_{\min} \quad (9)$$

$$c_2 = 1 + e_{\max} \quad (10)$$

ここに、 $\kappa = \kappa_0/a$ 、 $\gamma_{10}^* = \gamma_{10}^*/a$ 、 $c_2/c_1 = b$ である。

式(8)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。

$$D_r = \sqrt{\frac{N_{98}}{C_M}} \quad (11)$$

$$N_{98} = \frac{a_{98}}{b_{98} + \sigma_v'} \cdot N \quad (12)$$

ここに、 $N_{98}$ は換算N値、 $C_M$ は係数で $C_M = (1/0.16)^2$ 、 $N$ 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、 $a_{98}$ 、 $b_{98}$ は実験的に求められた係数で $a_{98} = 167$ (kN/m<sup>2</sup>)、 $b_{98} = 69$ (kN/m<sup>2</sup>)である。換算N値はN値が有効上載圧の影響を受けることを考慮するためにN値を上載圧補正したもので、有効上載圧が $\sigma_v' = 98$  kN/m<sup>2</sup>でのN値に換算されたものである。

式(8)と式(11)を連立させて相対密度を消去することにより次式を得る。

$$N_1 = C_M \cdot \left( \frac{\kappa \cdot F_v + \gamma_{10}^*}{c_1/c_2 + (\kappa \cdot F_v + \gamma_{10}^*)} \right)^2 \quad (13)$$

$$\gamma_{10}^* = \frac{\sqrt{N_0/C_M}}{(c_2/c_1) \cdot (1 - \sqrt{N_0/C_M})} \quad (14)$$

ここに、 $N_0$ 、 $N_1$ は砂杭圧入前後の換算N値である。

式(13)、(14)において $\kappa$ 、 $c_1$ 、 $c_2$ を決めれば圧入率 $F_v$ から圧入後の換算N値を求めることができる。 $c_1$ 、 $c_2$ は式(9)、(10)で示されたように、最大間隙比、最小間隙比で与えられるもので最大間隙比と最小間隙比を求めておく必要がある。経験的手法であるが、平間ら<sup>9)</sup>、および沼田ら<sup>10)</sup>の研究成果を利用すると最大間隙比と最小間隙比は次式で与えられる。

$$e_{\max} = 0.02 \cdot F_c + 1.0 \quad (15)$$

$$e_{\min} = 0.6 \quad (16)$$

ここに、 $F_c$ (%)は細粒分含有率（粒径75 $\mu$ m以下）である。

$\kappa$ については、過去のSCP工法の実績を利用すれば式(13)を変形した次式で定めることができる。

$$\kappa = \frac{(c_2/c_1) \cdot \gamma_{10}^* \cdot (1 - \sqrt{N_1/C_M}) - \sqrt{N_1/C_M}}{(c_2/c_1) \cdot F_v \cdot (\sqrt{N_1/C_M} - 1)} \quad (17)$$

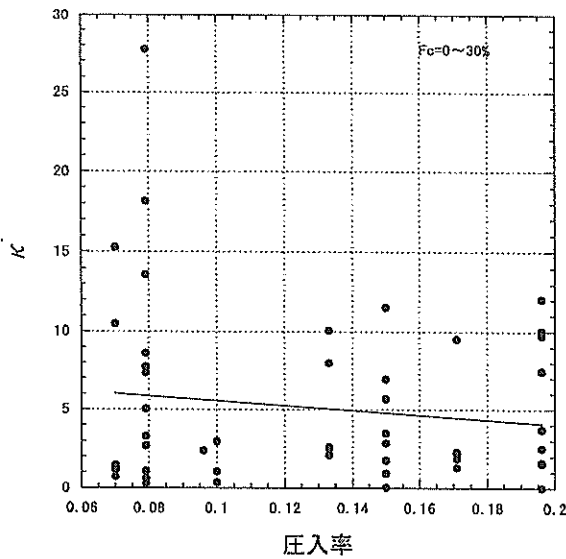


図-2 κと圧入率の関係

図-2は、過去のSCP工法の施工実績の、圧入前後N値、細粒分含有率 $F_c$ 、圧入率 $R_f$ から、式(17)を用いて得られたパラメータ $\kappa$ を圧入率に対してプロットしたものである。

図-2から $\kappa$ は $\kappa=5$ と求まり、結局下式を提案した。

$$N_1 = C_M \cdot \left( \frac{\kappa \cdot F_v + \gamma_1^*}{c_1/c_2 + (\kappa \cdot F_v + \gamma_1^*)} \right)^2 \quad (18)$$

$$\gamma_1^* = \frac{\sqrt{N_0/C_M}}{(c_2/c_1) \cdot (1 - \sqrt{N_0/C_M})} \quad (19)$$

$$C_M = (1/0.16)^2 \quad (20)$$

$$c_1/c_2 = \frac{0.02 \cdot F_c + 0.4}{0.02 \cdot F_c + 2.0} \quad (21)$$

$$\kappa = 5 \quad (22)$$

ここに、 $N_0$ 、 $N_1$ は圧入前後の換算N値、 $F_c$ (%)は細粒分含有率、 $F_v$ は圧入率である。

## 2.2 既提案法による増分N値と細粒分含有率の関係

図-3の●プロットはSCP工法による地盤の換算N値の増分と細粒分含有率関係の実測値(サンプル数 $n=142$ )、○プロットは式(18)~(22)に示した提案法による予測値で、実線は各プロットを線形回帰近似したものである。図-3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 $R_f=0.07\sim 0.2$ 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分含有率の差が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

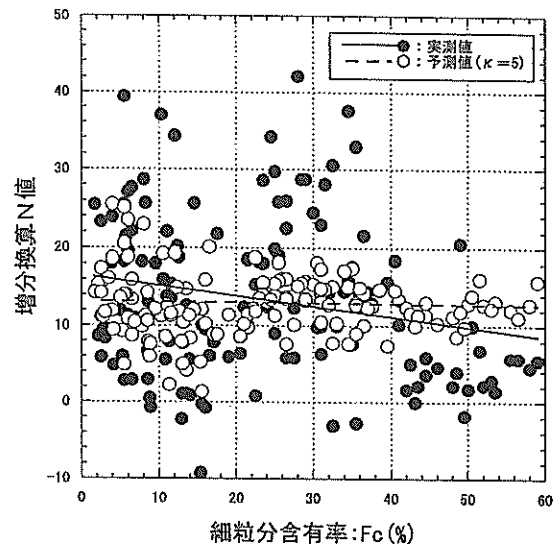


図-3 細粒分含有率と増分換算N値の関係  
(予測値は $\kappa=5$ )

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-3から、実測の増分換算N値は細粒分含有率の増加に伴い低下しており、細粒分含有率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(18)~(22)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分含有の影響が過小評価されているためである。なお、細粒分含有率が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ので、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。

以上のように、式(18)~(22)に示された既提案予測法は、細粒分含有率の締固め効果に及ぼす影響を適切に表現できておらず、改良効果を細粒分含有率50%ほどの場合でN値が1~3程度過大に評価している。次章において、式(18)~(22)に細粒分含有率の影響を反映させることを検討し、細粒分含有率の影響を考慮した新たな予測式の提案を行う。

## 3. 細粒分含有率の影響を考慮した予測式の提案

### 3.1 締固め効果におよぼす細粒分含有率の影響

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、細粒分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分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、既提案法（式（18）～（22））では②の影響は式（15）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、式（18）～（22）が細粒分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分含有の影響ではなく細粒分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（16）で参考にした沼田らの研究<sup>10)</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、細粒分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の影響を考慮した予測式を提案するので、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。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。

式（18）～（22）では圧入による間隙の減少（体積圧縮）を式（3）、（5）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（3）あるいは式（5）のパラメータに反映させることになる。式（5）は圧入率と累積せん断ひずみに関連づける式で、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（5）の $\epsilon_0$ 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（3）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>11)</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-4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 $\sigma'_c = 98\text{kN/m}^2$ 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を $\nu=0.3$ 、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。

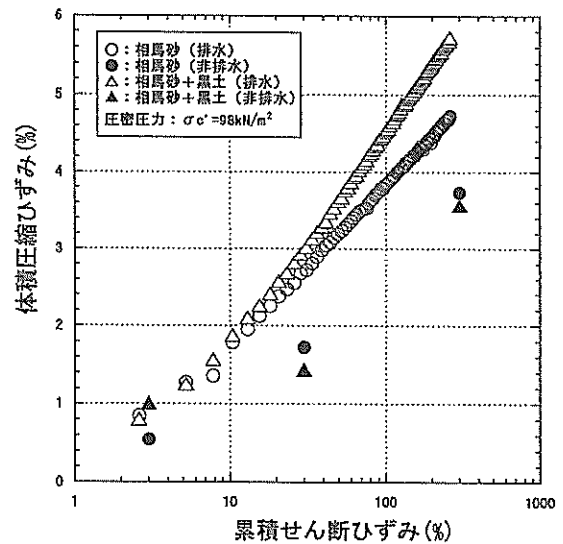


図-4 繰返しせん断による体積圧縮ひずみ

図-4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（3）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。

### 3.2 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する。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。

$$C = C_v \cdot \frac{t}{L^2} \quad (23)$$

$$= \frac{k \cdot t}{\gamma_w \cdot m_v \cdot L^2} \quad (24)$$

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(23)、(24)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のとり得る値を検討すると、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 $k=1 \sim 10^{-5}$ 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 $m_v=10^{-5}$ m<sup>2</sup>/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 $L=1 \sim 3$ mの数メートル、土層厚さから考えると $L=10$ 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>12)</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。

$$k = C_p \cdot D_p^2 \quad (25)$$

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(25)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-5で示されるように透水係数と代表粒径の関係を式(25)のような関係ではほぼ表すことができる。このことから、以下では細粒分を多く含む砂質土に対しても式(25)のような関係が成立すると考える。

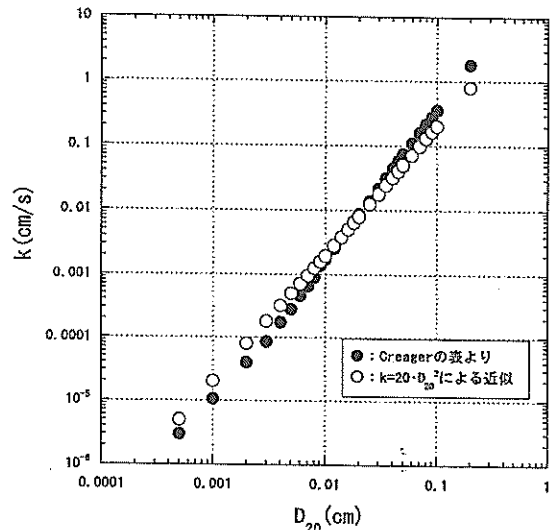


図-5 透水係数と代表粒径( $D_{20}$ )の関係

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。

$$D_p = 0.0075 \cdot U_c^{((p-F_c)/50)} \quad (26)$$

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(25)、(26)から透水係数と細粒分含有率の関係は次式で与えられることになる。

$$k = A_1 \cdot 10^{(A_2 - F_c)} \quad (27)$$

$$A_1 = 0.0075^2 \cdot C_p \cdot U_c^{(p/25)} \quad (28)$$

$$A_2 = \frac{-\log U_c}{25} \quad (29)$$

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

下することがわかる。なお、式(27)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。

### 3.3 細粒分含有率と予測式のパラメータの関係

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、式(18)～(22)に細粒分含有率の影響を取り込む。

#### (1) 排水性を反映させるパラメータ

提案法の基本となる式(3)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(3)で述べたように体積圧縮ひずみ  $\epsilon_v^*$  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)の誘導で、 $\kappa = \kappa_0/a$ 、 $\gamma_{*1} = \gamma_{*10}/a$  としており、パラメータ  $a$  は  $\kappa$  と  $\gamma_{*1}$  に含ませることができる。 $\gamma_{*1}$  は、式(14)で示されたように、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。

#### (2) パラメータと細粒分含有率の関係

図-6は式(17)を用いて圧入率が  $F_v=0.07\sim 0.20$  のSCP工法の実績から  $\kappa$  と細粒分含有率の関係を調べたものである。図-6から、 $\kappa$  は細粒分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(3)、(5)において圧入率、すなわち累積せん断ひずみが同じでも、細粒分含有率が高くなると排水性が低下して式(3)のパラメータ  $a$  が大きくなることに対応する。なお、図-6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(17)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  $\kappa$  の値に大きく影響するからである。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。

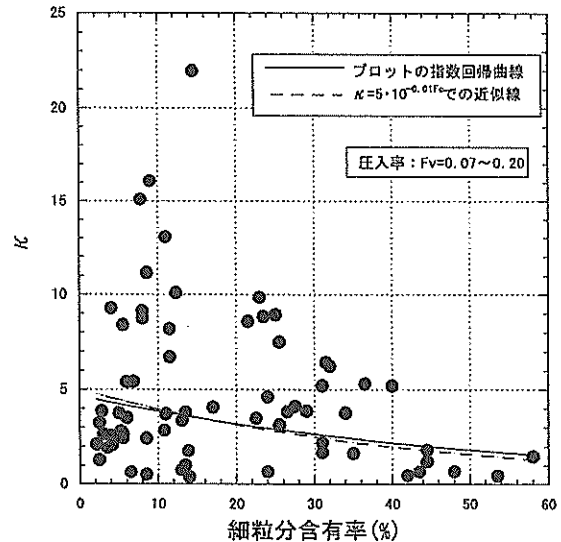


図-6  $\kappa$  と細粒分含有率の関係

図-6でパラメータ  $\kappa$  は細粒分含有率に対して大きなばらつきはあるが、細粒分含有率が高くなると低下する傾向が認められ、図-6の  $\kappa$  と細粒分含有率の関係から  $\kappa$  と細粒分含有率関係の近似式を求める。ここで、図-6の関係を近似する関数は、プロットのばらつきが大きいため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分含有率に対して指数関数となっているので、 $\kappa$  と細粒分含有率の関係も指数関数で近似することにした。

図-6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  $\kappa = 4.7 \cdot 10^{0.0082Fc}$  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-6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、 $\kappa$  と細粒分含有率の関係を下式で近似することとする。

$$\kappa = 5 \cdot 10^{-0.01Fc} \quad (30)$$

図-6中の破線は式(30)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。

### 3.4 実測データと予測値の比較

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分含有率による補正式を式(30)のよう

に示した。ここで、細粒分含有率による補正式を含めた新しい提案予測法をまとめると以下のとおりである。

$$N_1 = C_M \cdot \left( \frac{\kappa \cdot F_v + \gamma_1^*}{c_1/c_2 + (\kappa \cdot F_v + \gamma_1^*)} \right)^2 \quad (18)$$

$$\gamma_1^* = \frac{\sqrt{N_0/C_M}}{(c_2/c_1) \cdot (1 - \sqrt{N_0/C_M})} \quad (19)$$

$$C_M = (1/0.16)^2 \quad (20)$$

$$c_1/c_2 = \frac{0.02 \cdot F_c + 0.4}{0.02 \cdot F_c + 2.0} \quad (21)$$

$$\kappa = 5 \cdot 10^{-0.01 F_c} \quad (30)$$

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、 $F_v$ は圧入率、 $F_c$ は細粒分含有率(%)である。

図-7が式(18)～(21)、(30)を用いて予測を行った増分換算N値と細粒分含有率の関係で、実測データと合わせてプロットしている。図-7中の実線、破線は各プロットを線形回帰したものである。

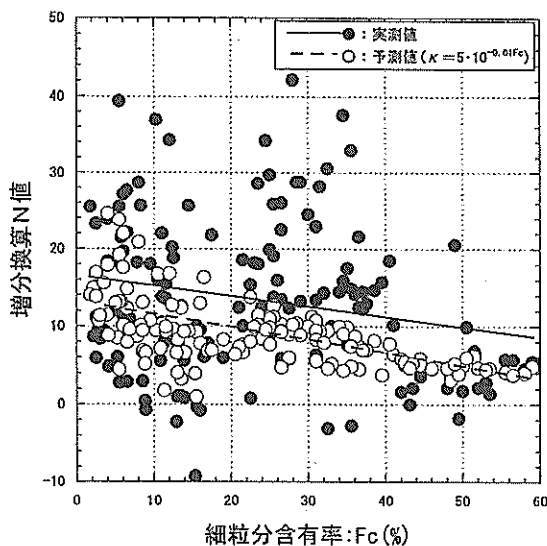


図-7 細粒分含有率と増分換算N値の関係  
(予測値は  $\kappa = 5 \cdot 10^{-0.01 F_c}$ )

図-7から、増分N値の予測値は細粒分含有率の増加とともに低下しており、実測値の傾向と整合していることがわかる。また、図-3における予測値が、細粒分含有率の低下にもなう増加N値の低下傾向を説明できていなかった点を改善できていることがわかる。

また、図-7の予測値は、実測値と比較すると小さめの値になっている。この点については、後述の4章で静止土圧係数との関連で検討を加えるが、大きな原因は相対密度とN値の関係を関連付ける式(11)のMeyerhofの式に起

因するものである。

以上、SCP工法による増加N値の予測に細粒分含有率の影響を取り入れることができた。次項において、式(18)～(21)、(30)を利用して、締固めに関する考察を行う。

### 3.5 予測式による締固め効果に関する細粒分の影響の考察

ここでは、締固めに関する細粒分の影響に関する簡単な考察として、新しい予測式により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。

新しく提案した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、元来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-8は細粒分含有率と低減率の関係調べたものである。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-8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-8の黒プロットから、新しい予測式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-8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 $\beta$ と比較すると新しい予測式によるものは大きめの低減率であることがわかる。

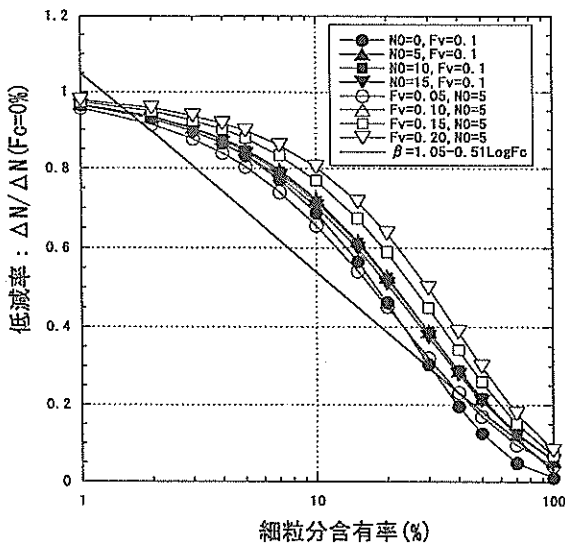


図-8 細粒分含有率と低減率の関係

(2) 砂杭圧入速度の影響

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、式(21)、(22)で示した排水係数  $C$  からわかるように載荷速度、排水距離なども影響を与える。式(30)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(30)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、砂杭圧入速度が締め固め効果に及ぼす影響を考察する。

式(30)を以下のように書く。

$$\kappa = A_3 \cdot 10^{A_4 \cdot F_c} \quad (31)$$

式(31)と式(27)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。

$$\kappa = A_3 \cdot \left( \frac{k}{A_1} \right)^{A_4/A_2} \quad (32)$$

式(30)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。

$$\frac{\kappa_{k_1}}{\kappa_{k_0}} = \left( \frac{k_1}{k_0} \right)^{A_4/A_2} \quad (33)$$

式(33)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(24)から透水係数  $k$  と載荷時間  $t$  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載荷時間  $t$  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、 $\kappa$  と載荷時間  $t$  に関して式(33)と同様に以下の式を得ることができることになる。

$$\frac{\kappa_{t_1}}{\kappa_{t_0}} = \left( \frac{t_1}{t_0} \right)^{A_4/A_2} \quad (34)$$

ここに、 $\kappa_{t_0}$  は載荷時間  $t_0$  の場合の  $\kappa$ 、 $\kappa_{t_1}$  は載荷時間が  $t_1$  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載荷時間は圧入する砂杭の長さに比例して大きくなる。したがって、砂杭の長さが長くなると式(24)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3.2節でも述べたが、SCP工法の場合は砂杭が半径方向に拡張されることが地盤に対する載荷になるので、杭長で正規化した単位長さ当たりの砂杭の圧入時間が載荷時間となる。結局これは圧入速度の逆数となり、式(34)を次式に書き改める。

$$\frac{\kappa_{r_1}}{\kappa_{r_0}} = \left( \frac{r_0}{r_1} \right)^{A_4/A_2} \quad (35)$$

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(35)のパラメータのうちパラメータ  $A_2$  は式(29)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(30)から  $A_4=-0.01$  とする。したがって、式(35)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-6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  $F_c=60\%$  の場合と

する。細粒分含有率 $F_c=60\%$ の場合には、通常のSCP工法では式(30)から図-9(a)に示すように $\kappa=1.26$ となり、この場合の砂杭圧入速度を $t_0$ として $\kappa_{t_0}=1.26$ 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 $t_1$ とすると $t_0/t_1=2$ となる。 $A_1/A_2=0.25$ としているので式(35)から図-9(b)に示すように $\kappa_{t_1}/\kappa_{t_0}=2^{0.25}=1.2$ となり $\kappa_{t_1}=1.51$ 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固め効率が向上したことになる。あるいは式(30)からは、図-9(a)に示すように細粒分含有率が $F_c=60\%$ の地盤から $F_c=52\%$ の地盤に見かけ上低下して同じ圧入率でも締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 $F_c=35\%$ に低下したことになる。

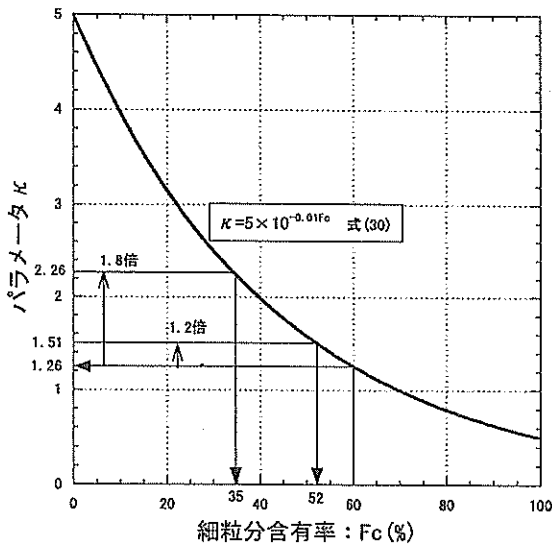


図-9(a) 細粒分含有率とパラメータ $\kappa$ の関係

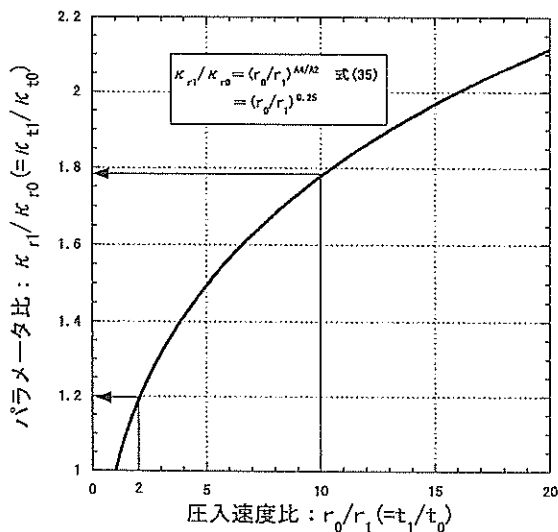


図-9(b) 圧入速度比とパラメータ比の関係

以上から、砂杭圧入速度が締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>13)</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小さいはずの静的な機構に基づく締固め工法が、動的な締固め工法(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>14)</sup>などにも整合する。

### (3) 砂杭圧入間隔の影響

荷重時間と同様なことは式(24)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。パーチ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、式(24)および前述の荷重時間の考え方から $\kappa$ は砂杭圧入間隔の自乗の $A_1/A_2$ 乗に反比例することになり、このことは $\kappa$ が圧入率 $F_c$ の $A_1/A_2$ 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 $A_1/A_2=0.25$ であったとすると $\kappa$ は圧入率 $F_c$ 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

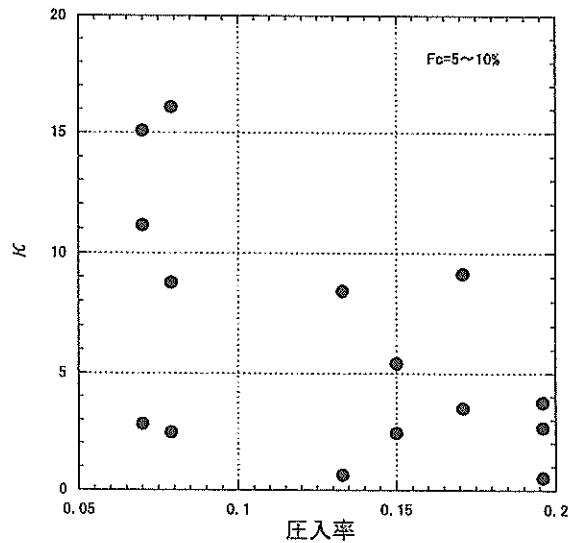


図-10  $\kappa$ と圧入率の関係

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。

#### 4. 静止土圧係数の影響の検討

前章での細粒分含有率の影響を考慮した、式(18)～(21)、(30)の締固め後のN値の予測法は、図-7で示したように実測データより小さめのN値を予測する傾向にあった。この原因の一つが、N値と相対密度の関係で利用した式(11)、(12)のMeyerhofの提案式に、静止土圧係数の影響が反映されていないことにあると考えられる。そこで、ここではMeyerhofの提案式に静止土圧係数の影響を取り込み、式(18)～(21)、(30)の予測が過小評価した原因の確認を行う。

##### 4.1 N 値、相対密度、静止土圧係数、圧入率の関係に関する既往の研究

(1) N値—鉛直有効応力—相対密度関係におよぼす静止土圧係数の影響

圧入後杭間N値の予測式の誘導にあたって用いたMeyerhofの式(11)、(12)を変形して再掲すると下式のようになる。

$$D_r = \sqrt{\frac{a_{98}}{C_M \cdot (b_{98} + \sigma_v')}} \cdot N \quad (36)$$

ここに、 $C_M$ は係数で $C_M = (1/0.16)^2$ 、 $M$ 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、 $a_{98}$ 、 $b_{98}$ は実験的に求められた係数で、 $a_{98} = 167$  (kN/m<sup>2</sup>)、 $b_{98} = 69$  (kN/m<sup>2</sup>)である。

式(36)は鉛直有効応力(有効上載圧)が一定であればN値と相対密度の関係は一意的な関係があることを示している。しかしN値と相対密度の関係に影響を与えるのは鉛直有効応力だけではなく、水平有効応力、すなわち $K_0$ 値も影響をおよぼすことが示されている。このようなことについて古賀らは、大型三軸試験装置を利用してN値—相対密度—鉛直有効応力— $K_0$ 値の関係を調べている<sup>15)</sup>。古賀らの実験では同一の鉛直有効応力で同一の相対密度でも $K_0$ 値の大きい方が大きなN値になることが示されており、 $K_0$ 値が変化する場合、鉛直有効応力だけを用いるよりも水平有効応力の影響も取り入れた下式の平均有

効主応力を用いた方が良いことが報告されている。

$$\sigma_m' = \frac{1 + 2 \cdot K_0}{3} \cdot \sigma_v' \quad (37)$$

ここに、 $\sigma_m'$ は平均有効主応力(kN/m<sup>2</sup>)、 $K_0$ は静止土圧係数である。

なお、安田らの報告<sup>16)</sup>では相対密度が大きいとこると小さいところでは $K_0$ 値のN値に及ぼす影響の大きさは異なり古賀らの結果と一致しないようであるが、N値と相対密度の関係は $K_0$ 値の大きな方が大きめのN値になることが示されている。

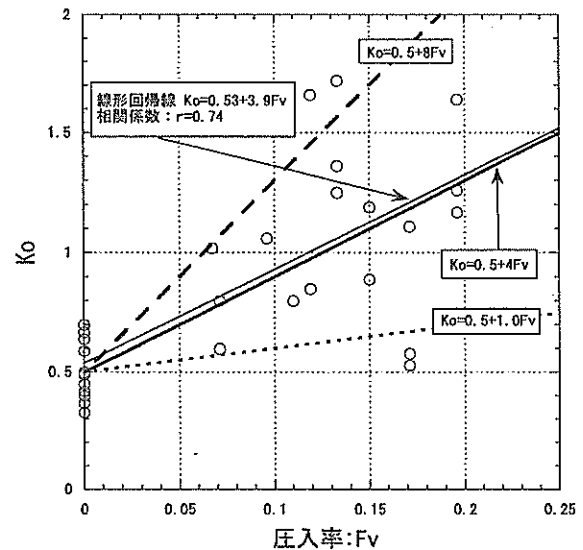


図-11  $K_0$  値と圧入率の関係

(2) 圧入率と $K_0$ 値の関係

図-11はSCP工法施工での $K_0$ 値と圧入率の関係に関する報告をまとめたものである(プロットの一部には範囲で示された $K_0$ 値の最大値と最小値があるが全体の傾向には影響していない)。図-11において圧入率が $F_v = 0$ のものは圧入前の $K_0$ 値である。また、図-11の細実線はプロットの関係の線形回帰線である。図-11から、大きなばらつきはあるが、圧入率が大きくなるほど $K_0$ 値が大きくなる関係があることが認められる。

(3) 圧入率の影響を反映させた相対密度とN値の関係

相対密度とN値の関係は $K_0$ 値の影響を受け、さらに $K_0$ 値は圧入率の影響を受けることを(1)と(2)で示した。ここでは、古賀らの報告を参考に圧入率の影響を反映させたMeyerhofの式の修正を行う。

Meyerhofの式で相対密度を $K_0$ 値で平均有効主応力に依存した形に変換すると下式になる。

$$D_r = \sqrt{\frac{a_m}{C_M \cdot (b_m + \sigma_v' (1 + 2 \cdot K_0) / 3)}} \cdot N \quad (38)$$

ここに、 $a_m$ と $b_m$ は係数である。

ここで、 $a_m$ と $b_m$ は式(34)が導かれた条件での静止土圧係数から定まるが、 $K_0$ 値は締固めなどの行われていない通常の地盤での値と考え $K_0=0.5$ を仮定する。式(36)は $K_0=0.5$ では式(34)と同じ $D_r$ を与えなければならないので、 $a_m = a_{98} \cdot (1 + 2 \cdot K_0) / 3 = 167 \cdot (1 + 2 \cdot 0.5) / 3 = 111$  (kN/m<sup>2</sup>)、 $b_m = b_{98} \cdot (1 + 2 \cdot K_0) / 3 = 69 \cdot (1 + 2 \cdot K_0) / 3 = 46$  (kN/m<sup>2</sup>)となる。以降では $a_m = 111$  (kN/m<sup>2</sup>)、 $b_m = 46$  (kN/m<sup>2</sup>)とする。

次に、 $K_0$ 値と圧入率の関係を既往の報告から得た図-11から求めることとする。圧入率がゼロの締固めされていない地盤では $K_0=0.5$ とし、図-11の各プロットを式(39)により線形近似する。なお、プロットには大きなバラツキがあり、 $K_0$ 値の増加には他の要因の影響もあると考えられる。これに対して式(39)は単純な近似であるが、これはここでは $K_0$ 値の影響を予測式に取り込むことに主眼を置いており、精度向上については今後の課題である。

$$K_0 = 0.5 + \alpha \cdot F_v \quad (39)$$

ここに、 $\alpha$ は線形近似の勾配で、図-11の実線で示す平均的なラインでは $\alpha=4$ 、圧入率に対して大きめの $K_0$ 値に対応する破線では $\alpha=8$ 、小さめに対応する点線では $\alpha=1$ になっている。

式(38)と式(39)を連立させると、砂杭圧入による $K_0$ 値増加の影響を考慮した相対密度とN値の関係を次式で得ることができる。

$$D_r = \sqrt{\frac{a_m}{C_M \cdot (b_m + 2 \cdot \sigma_v' (1 + \alpha \cdot F_v) / 3)}} \cdot N \quad (40)$$

ここに、 $a_m = 111$  (kN/m<sup>2</sup>)、 $b_m = 46$  (kN/m<sup>2</sup>)、 $\alpha = 1 \sim 8$ で、 $\alpha=0$ とした場合には式(40)は式(36)に一致する。

#### 4.2 圧入による $K_0$ 値の変化を考慮した予測式

前章および2章で示した杭間N値の予測式は、相対密度と圧入率の関係式、相対密度とN値の関係式、の2つの式

を連立させて誘導したもので、後者の相対密度とN値の関係式は式(11)、(12)、すなわち式(37)を用いていた。ここでは、 $K_0$ 値の影響を調べるために、式(11)、(12)を砂杭圧入による $K_0$ 値変化の影響を考慮した式(40)に置き換え、圧入による $K_0$ 値の変化を考慮した杭間N値の予測式を誘導する。

##### (1) $K_0$ 値の変化を考慮した予測式の誘導

前章および2章と同じ要領で、砂杭圧入によるN値の予測式を式(40)と式(8)を連立させて誘導すると下式になる。

$$N_1 = C_M \cdot \left( \frac{\kappa \cdot F_v + \gamma_1^*}{c_1 / c_2 + \kappa \cdot F_v + \gamma_1^*} \right)^2 \cdot A_m \cdot B_m \quad (41)$$

$$A_m = \frac{b_m + (2/3) \cdot (1 + \alpha \cdot F_v) \cdot \sigma_v'}{a_m} \quad (42)$$

$$B_m = \frac{a_{98}}{b_{98} + \sigma_v'} \quad (43)$$

$$\gamma_1^* = \frac{(N_0 / (A_{m0} \cdot B_m \cdot C_M))^{0.5}}{(c_2 / c_1) \cdot (1 - (N_0 / (A_{m0} \cdot B_m \cdot C_M))^{0.5})} \quad (44)$$

$$A_{m0} = \frac{b_m + (2/3) \cdot \sigma_v'}{a_m} \quad (45)$$

ここに、 $N_1$ は砂杭圧入後の換算N値、 $N_0$ は圧入前の換算N値（それぞれ式(43)の $B_m$ で除すると、鉛直有効応力により補正されない、計測N値になる）である。

ここで、前章と同様にパラメータ $\kappa$ は過去のSCP工法の実績から算出することができ、式(41)を変形した下式を用いて以下のように統計的に算出する。

$$\kappa = \frac{(c_2 / c_1) \cdot \gamma_1^* \cdot \left( 1 - \sqrt{N_1 / (C_M \cdot A_m \cdot B_m)} \right) - \sqrt{N_1 / (C_M \cdot A_m \cdot B_m)}}{(c_2 / c_1) \cdot F_v \cdot \left( \sqrt{N_1 / (C_M \cdot A_m \cdot B_m)} - 1 \right)} \quad (46)$$

パラメータ $\kappa$ は式(46)と、前章と同様にSCP工法の $N_1$ 、 $N_0$ 、圧入率の実績から得られ、得られたパラメータ $\kappa$ と細粒分含有率の関係から $\kappa$ を細粒分含有率の関数として同定する。



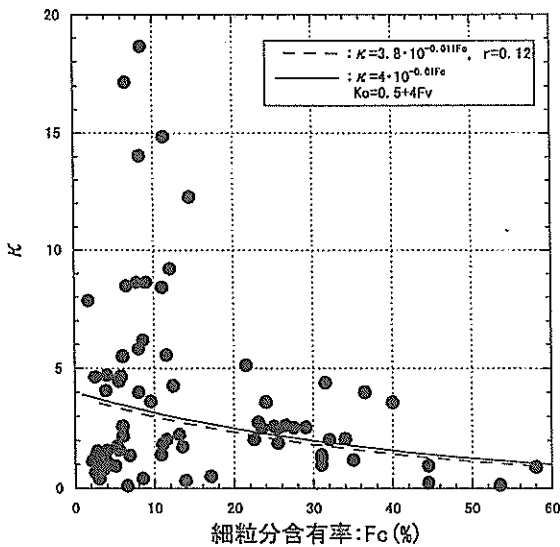


図-12 パラメータ  $\kappa$  と細粒分含有率の関係

図-12のプロットは図-6と同じデータを用い、 $\alpha=4$ として式(41)～式(46)から  $\kappa$  を算出したものである。図-12のプロットはばらつきが大きいが、 $\kappa$  と細粒分含有率の関係は、3章と同じく指数関数で回帰分析すると点線のようになる。ばらつきなどの精度を考慮して  $\kappa$  と細粒分含有率の関係を次式で近似することとする (図-12中の実線)。

$$\kappa = 4 \cdot 10^{-0.01F_c} \quad : \alpha = 4 \quad (47)$$

以上から、圧入前の原地盤N値、鉛直有効応力、細粒分含有率、および圧入率が与えられれば、式(41)～(45)および式(47)により砂杭圧入後の杭間N値を予測することができる。なお、ここでは  $\alpha$  について図-11の平均的な関係として  $\alpha=4$  を採用して式(47)を算出したが、 $\alpha=1$  の場合には  $\kappa=7 \cdot 10^{-0.01F_c}$ 、 $\alpha=8$  の場合には  $\kappa=2 \cdot 10^{-0.005F_c}$  が得られた。

(2)  $K_0$  値を考慮した予測式による予測結果と考察  
式(41)～(45)、(47)による予測増分N値を細粒分含有率との関係で示したのが図-13である。また、図-13中には実測データもプロットしてある。

図-13から、前章の図-7での予測値と実測値の比較では、予測値が実測値よりも小さめであったが、図-13では解消されている。このようなことから、前章で提案した予測法が実測値を過小評価する傾向にあったのは、圧入に伴う  $K_0$  値の変化の影響が考慮されていなかったからである

といえる。

次に、実務への適用に関して本章の  $K_0$  値を考慮した方法 (式(41)～(45)、(47)) と前章の方法 (式(18)～(21)、(30)) を比較検討すると、本章の  $K_0$  値を考慮した方法は、平均的には前章の方法より良い予測結果ではあるが、細粒分含有率が  $F_c=40 \sim 50\%$  のあたりで予測プロットの多くが大きめの値になっており、危険側の予測結果になっている。また、本章の  $K_0$  値を考慮した方法は、図-11に示した  $K_0$  値と圧入率の関係を利用しているが、図-11は大きなばらつきを含んだ関係である。このようなことから、実務への適用にあたっては安全側を考慮して、 $K_0$  値の影響を考慮していない前章の方法 (式(18)～(21)、(30)) を用いた方が良いといえる。 $F_c$  が20%以下の条件の下では本章の方法 (式(41)～(45)、(47)) がより良い予測結果を与える。

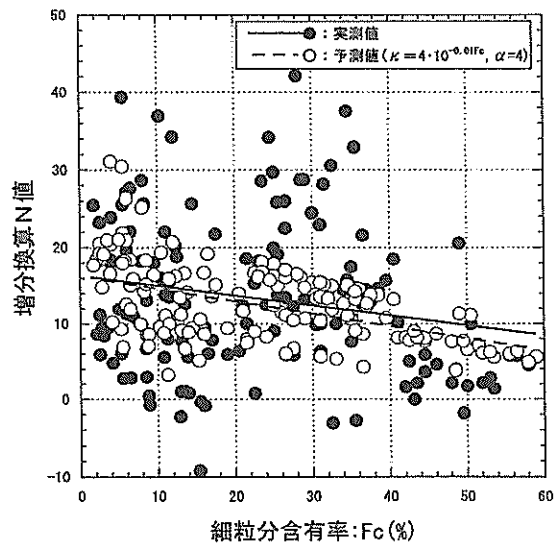


図-13 細粒分含有率と増分換算 N 値の関係  
(予測値は  $\kappa = 4 \cdot 10^{-0.01F_c} : \alpha = 4$ )

## 5. 考察

細粒分含有率の締固め効果におよぼす影響を考慮した改良後N値の予測式を3章で新しく提案した。ここでは、液状化対策を念頭とした目標N値に関して3章で提案した方法を、4章の  $K_0$  値を考慮に入れた方法と比較しながら考察する。さらに、予測式の基本となるメカニズムは砂杭打設という行為を、地盤に対するせん断と捉え、せん断による負のダイレイタンスにより地盤が締まるとした

ものである。この締固めメカニズムはSCP工法だけでなく、他の締固め工法にも適用できるものと考えられる。そこで、SCP工法とは異なる、静的圧入締固め工法による改良後N値の予測法として、3章で提案した新手法を適用して考察する。

5.1 細粒分含有率の影響を考慮した予測式についての考察

港湾施設の液状化の予測・判定<sup>17)</sup>は、等価N値と等価加速度を算定して、図-14の判定チャートを用いて行われる。

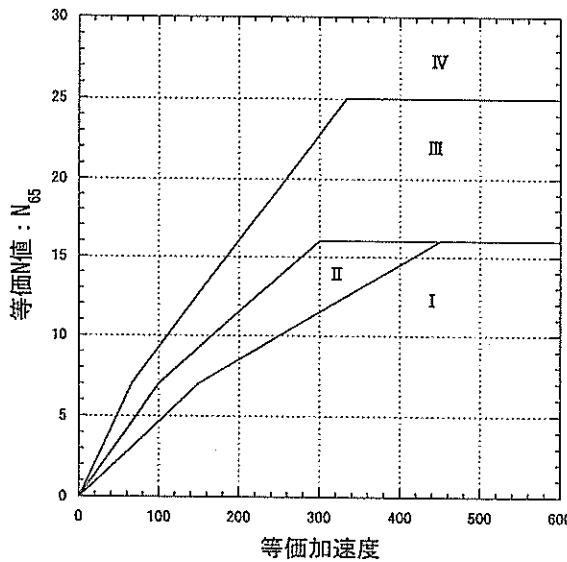


図-14 液状化の判定チャート

図-14の判定チャートで等価N値と等価加速度の関係が、図-14中のIVにプロットされる場合には「液状化しない」、IIIにプロットされる場合に「液状化しない可能性が高い」と予測され、SCP工法で液状化対策を行う場合には、砂杭圧入後の等価N値がIVもしくはIIIにプロットされるように圧入率を決めることになる。

ここで、等価N値は下式で与えられる。

$$N_{65} = \frac{N - 0.019 \cdot (\sigma_v' - 65)}{0.0041 \cdot (\sigma_v' - 65) + 1.0} \quad (48)$$

ここに、 $N_{65}$ は等価N値で、計測されたN値を有効上載圧が $\sigma_v' = 65 \text{ kN/m}^2$ の有効上載圧に補正されたもので、前章までの換算N値とはN値の補正法が異なるものである。

等価N値と換算N値 $N_{98}$ は、対象とする有効上載圧(N値が計測された位置での有効上載圧)の値を用いて次式で関連付けることができる。

$$N_{65} = \frac{N_{98} \cdot (b_{98} + \sigma_v') / a_{98} - 0.019 \cdot (\sigma_v' - 65)}{0.0041 \cdot (\sigma_v' - 65) + 1.0} \quad (49)$$

図-15は式(49)で示される等価N値と換算N値の関係を調べたもので、図-15ではN値の計測された位置の有効上載圧が $\sigma_v' = 29, 65, 98, 196, 294 \text{ kN/m}^2$ の場合で比較している。図-15から全般的に等価N値の方が小さい値を示している。また、同じ換算N値に対して、換算N値の小さいところでは有効上載圧が小さい方が等価N値は大きく、換算N値の大きいところでは有効上載圧が大きい方が等価N値は大きくなっている。このように、換算N値と等価N値の関係は有効上載圧により異なる値となるので、等価N値を用いる場合には、式(18)あるいは、式(41)で求めた圧入後の予測換算N値を、式(48)により等価N値に変換する必要がある。

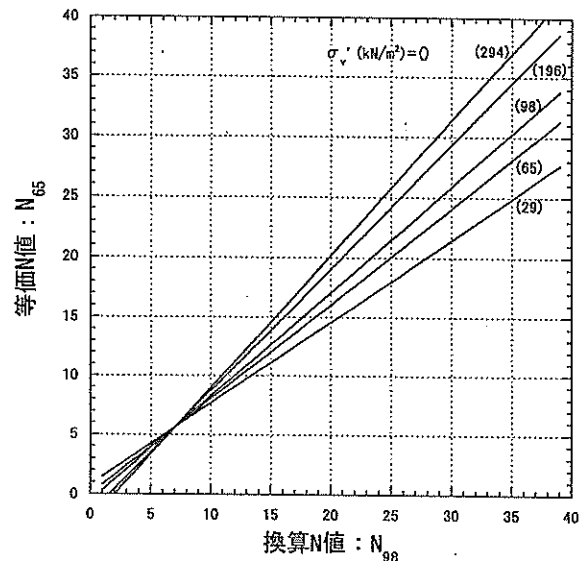


図-15 等価N値と換算N値の関係

図-16は、等価N値が $N_{65} = 2$ の原地盤に対してSCP工法を施工した場合の圧入後の等価N値を、式(18)～(21)、(40)で予測した場合( $K_0$ 値の変化を無考慮)および、式(41)～(45)、(47)で予測した場合( $K_0$ 値の変化を考慮)の結果を圧入率に対して示したものである。図-16(a)は原地盤の細粒分含有率が $F_c = 0\%$ で有効上載圧が $\sigma_v' = 65 \text{ kN/m}^2$ 、図-16(b)は $F_c = 0\%$ 、 $\sigma_v' = 98 \text{ kN/m}^2$ 、図-16(c)は $F_c = 30\%$ 、 $\sigma_v' = 65 \text{ kN/m}^2$ 、図-16(d)は $F_c = 30\%$ 、 $\sigma_v' = 98 \text{ kN/m}^2$ 、図-16(e)は $F_c = 60\%$ 、 $\sigma_v' = 65 \text{ kN/m}^2$ 、図-16(f)は $F_c = 60\%$ 、 $\sigma_v' = 98 \text{ kN/m}^2$ のものである。また、図-16中には、図-14で等価加速度が400Gal(非常に大きな地震動での等価加速度に相当する)でIVという予測になる等価N値( $N_{65} = 25$ )、IIIとなる等価

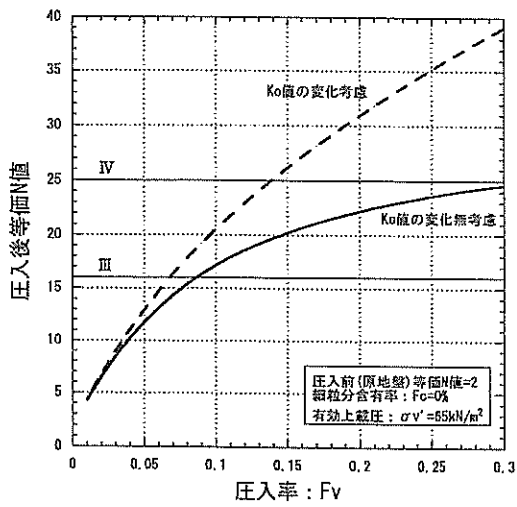


図-16(a) 圧入率と等価N値 ( $F_c=0\%$ ,  $\sigma'_v=65\text{kN/m}^2$ )

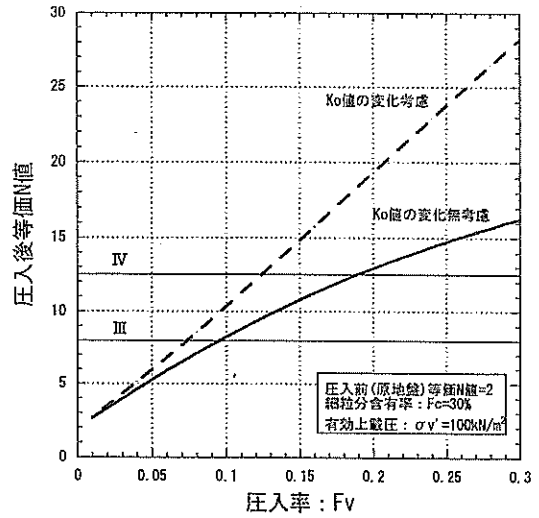


図-16(d) 圧入率と等価N値 ( $F_c=30\%$ ,  $\sigma'_v=98\text{kN/m}^2$ )

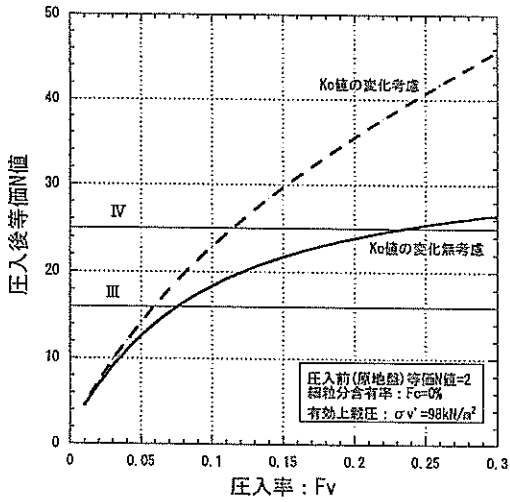


図-16(b) 圧入率と等価N値 ( $F_c=0\%$ ,  $\sigma'_v=98\text{kN/m}^2$ )

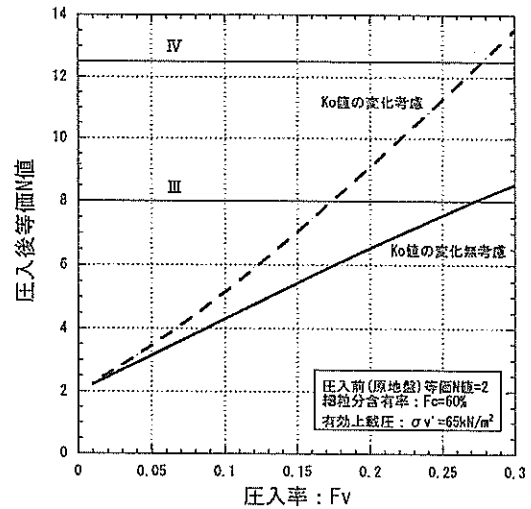


図-16(e) 圧入率と等価N値 ( $F_c=60\%$ ,  $\sigma'_v=65\text{kN/m}^2$ )

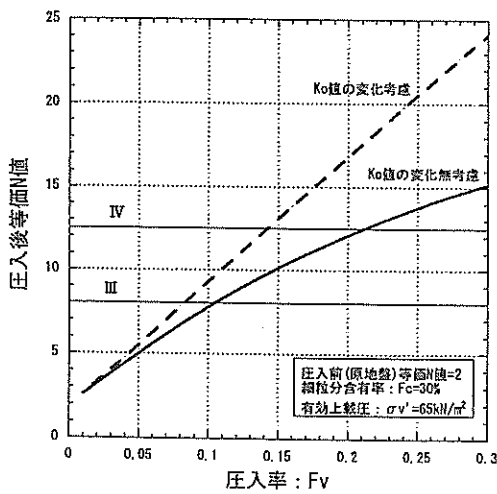


図-16(c) 圧入率と等価N値 ( $F_c=30\%$ ,  $\sigma'_v=65\text{kN/m}^2$ )

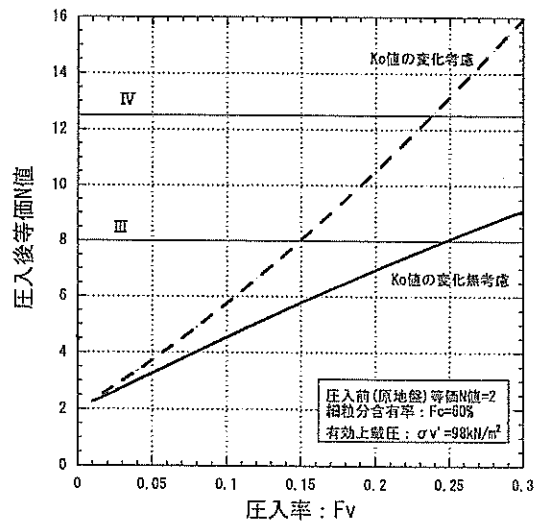


図-16(f) 圧入率と等価N値 ( $F_c=60\%$ ,  $\sigma'_v=98\text{kN/m}^2$ )

N値( $N_{60}=16$ )を実線で示してある。なお、細粒分含有率が $F_c=15\%$ 以上の場合には、図-14の各領域の境界のラインの等価N値を半分にまで低減できるので、図-16(c)～(f)のIV, IIIの実線は、IVの場合に $N_{60}=12.5$ , IIIの場合に $N_{60}=8$ としている。

細粒分含有率が $F_c=0\%$ の図-16(a)と(b)を比較すると、有効上載圧が大きい方である図-16(b)の方が同じ圧入率に対して大きな圧入後の等価N値となっており、図-16(c)と(d), 図-16(e)と(f)についても同様である。これは、図-15で説明したように、換算N値が大きいところでは同じ値の換算N値に対して、有効上載圧の大きい方が大きな等価N値になる関係があるからである。

図-16(e)あるいは図-16(f)を見ると細粒分含有率が $F_c=60\%$ あるにもかかわらず、圧入率が $F_r=0.25$ で、 $K_0$ 値を考慮したものは $N_{60}=12$ 程度、 $K_0$ 値を無考慮のものは $N_{60}=8$ 程度の等価N値が予測されている。いずれも、SCP工法で通常考えられている改良後のN値と比較して高い値といえる。細粒分には粘土分、シルト分があり、予測法の提案ではシルト分主体、粘土分主体などの細粒分の多い土層のデータが入り混じっていると考えられる。粘土分主体の場合にはN値が上がりにくいことが予想されるので、細粒分含有率が多い場合にはシルト分主体であるか、粘土分主体であるかを留意した方がよいといえる。

液状化の予測・判定に関して考察すると、有効上載圧が $\sigma_v'=65\text{kN/m}^2$ の条件で、細粒分含有率が $F_c=0\%$ の場合(図-16(a)), IVの判定の等価N値 $N_{60}=25$ を得るためには $K_0$ 値を考慮した場合には圧入率が $F_r=0.14$ ,  $K_0$ 値を考慮しない場合には $F_r=0.3$ 以上, IIIの等価N値 $N_{60}=16$ を得るためには $K_0$ 値考慮で $F_r=0.07$ ,  $K_0$ 値無考慮で $F_r=0.09$ 程度の圧入率が必要となる予測になっている。

圧入率が $F_r=0.3$ 以上というのは $F_c=0\%$ の砂地盤ではSCP工法の施工はかなり困難である。このことから、等価加速度が $400\text{Gal}$ を超えるような外力に対して、IVの等価N値を得るための圧入率を予測する場合には、 $K_0$ 値の変化を考慮しないと事実上SCP工法の設計が成り立たないこととなる。しかし、 $K_0$ 値の変化は図-11のプロットからわかるように非常にばらつくので、過去の類似の地盤での施工データを参考にしたり、試験施工などを行い、圧入後のN値を予測すべきである。IIIに対応した等価N値の予測については、 $K_0$ 値を考慮する場合も考慮しない場合もほぼ同じ値となっている。他のケース(図-16(b)～(f))の場合も、 $K_0$ 値を考慮した場合と $K_0$ 値を無考慮の場合で圧入率にそれほど大きな違いはないが、IVの等価N値に対しては圧入率に大きな違いが見られる。

以上から、液状化の予測・判定のIIIに対応した等価N

値に対する圧入率の設定では、式(18)～(21), (40)を用いて圧入率を設定して実務上問題が無い。しかし、IVに対応した等価N値に対する設定では、特に細粒分の少ない場合に施工上困難な大きな圧入率を与える。このような場合には $K_0$ 値の影響を考慮するか、過去の施工実績などを参考にして圧入率を設定した方がよい。

## 5.2 他の締固め工法への予測式の適用性に関する考察

3章で提案した式(18)～(21), (40)を、SCP工法以外の締固め工法に適用できるか否かを考察する。対象とするのは、静的圧入締固め工法である。静的圧入締固め工法は、図-17に示すように<sup>18)</sup>ボーリング孔を設けて、モルタルを高圧で静的に圧入していき周囲の緩い地盤を締め固める工法で、SCP工法とは施工方法の全く異なる工法である。本工法は、SCP工法と異なり振動・騒音を伴わないので、既設構造物直下や近傍の地盤に対して締固めが可能な工法である。

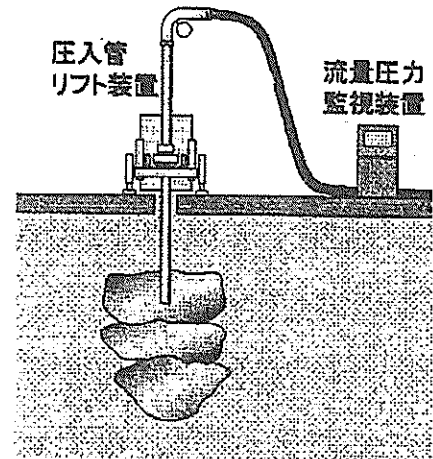


図-17 静的圧入締固め工法の概要(文献18)を修正)

図-18は、式(17)を用いてパラメータ $\kappa$ を静的圧入締固め工法の施工実績から求め、細粒分含有率との関係で示したものである<sup>19)</sup>。

図-18から、パラメータ $\kappa$ と細粒分含有率 $F_c$ の間には次式のような関係が得られた。

$$\kappa = 5 \cdot 10^{-0.013 \cdot F_c} \quad (50)$$

式(50)を、SCP工法のデータで求めた式(30)と比較すると係数がほぼ同じ値になっている。静的圧入締固め工法とSCP工法では締固めの方法が異なるのであるが、パラメータ $\kappa$ と細粒分含有率 $F_c$ の関係がほぼ同じになっているのは興味深いことである。

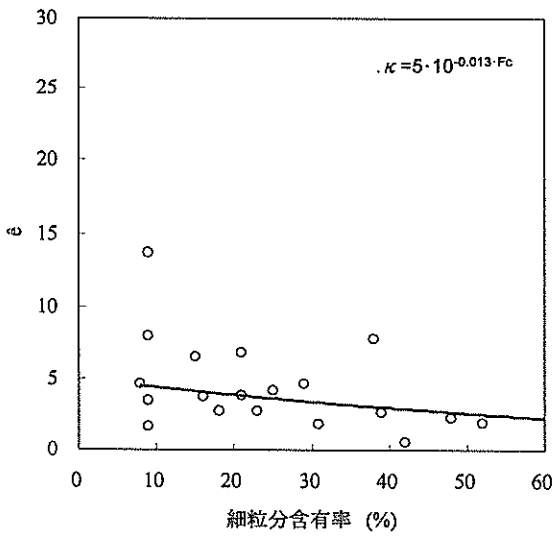


図-18 静的圧入締固め工法のパラメータ  $\kappa$  と細粒分含有率の関係

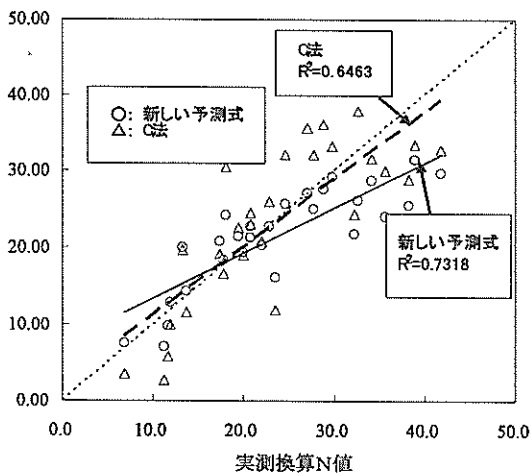


図-19 静的圧入締固め工法の圧入後N値の予測値と実測値の比較

図-19は、式(51)と式(18)～(21)による予測法の予測精度を確認するために、予測換算N値と実測換算N値の関係を調べたものである。図-19中には式(18)～(21)、(51)により予測した○プロットと、従来から静的圧入締固め工法も用いられていたSCP工法でのC法による予測を△プロットで比較のために示している。

図-19から、式(18)～(21)、(51)による予測値(実線)の方が、C法による予測値(破線)よりも実測値との相関が良いことがわかる。また、新しく示した予測式の方が安全側の予測となっている。

以上から、静的圧入締固め工法に対しても、ここで提案した予測手法が適用できることが示されたといえる。

また、このようなことから、SCP工法、静的圧入締固め工法以外の締固め工法に対しても、本論文の予測手法が適用できると考えられる。

## 6. 結論

著者が既に提案したSCP工法の圧入率設定のための圧入後N値の予測法には細粒分の影響が考慮されておらず、実務への適用性が低かった。そこで、実務への適用性を高めるために修正を行い、細粒分含有率の影響を考慮した方法を提案し以下のような結果が得られた。なお、今回新しく提案した方法は従来から設計で用いられているのと同じく、圧入前N値、細粒分含有率、圧入率の3つが必要な情報である。

(1) 細粒分含有率が高くなると締固め効果が低下するが、これを既提案法の締固めメカニズムを規定する関係式に遡り排水性の観点から考察した。そして、予測法のパラメータ  $\kappa$  と細粒分含有率の間に関係式を導き出し、予測法に細粒分の影響を反映させる方法を新たに提案した(式(18)～式(21)、式(30))。

(2) 上記による圧入後N値の予測値は、実測データを過小評価する傾向にあった。これは、静止土圧係数  $k_0$  の変化が考慮できていないことによる。

(3) 新しい提案法による施工速度についての考察から、圧入の施工速度が遅い方が締固め効率が高いことが示された。

(4) また、C法と呼ばれる方法で用いられていた細粒分含有率による圧入後N値の低減率と比較したところ、新しい提案法によるものには原地盤N値、圧入率が影響し、新しい提案法の方が大きめの低減率を与える(大きな増分N値となる)ことが示された。

(5)  $k_0$  値の影響を考慮した方法も導いたが、細粒分含有率が高い時には、危険側の予測となる可能性が高い方法であった。

上記の提案法を液状化対策のための圧入率設定の観点から考察したところ以下のことがわかった。

(6) 液状化の予測・判定のⅢに対応した等価N値に対する圧入率の設定では、式(18)～(21)、(30)を用いた圧入率の設定に実務上の問題は無い。

(7) 液状化の予測・判定において、非常に大きな等価加速度に対応した等価N値を設定する場合には、式(18)～(21)、(30)は施工が困難な大きな圧入率を与える。このような場合には  $k_0$  の影響を考慮するか、過去の施工実績などを

参考にして圧入率を設定した方が良い。

今回新しく提案した方法は、SCP工法を対象にしたものであるが、誘導課程から他の締固め工法に対しても適用が可能と考えられるものであった。そこで、静的圧入締固め工法に対して適用を試みた。その結果以下のことがわかった。

(8) 静的圧入締固め後の実測N値に対して、従来から用いられた手法による予測値よりも、新しい提案法による予測値の方が高い相関が得られ、提案法の適用性が確認できた。

(9) SCP工法の実績から算出したパラメータ  $\alpha$  と静的圧入締固め工法の実績から算出したパラメータ  $\alpha$  に大きな違いは認められなかった。

## 7. あとがき

砂質地盤を対象としたSCP工法の圧入率設定のための設計法を新たに提案した。N値からN値を予測するという手法であることからわかるように、非常に大きなばらつきのあるデータを取り扱ったものであることに注意が必要である。さらに、提案手法はMeyerhofの式など、既存の経験式を多用している。このような経験式はいく種類も提案されている。ここで用いた経験式は著者が代表的なものとして判断して用いたものである。他の経験式を用いた方がより精度の高い予測が可能であるかは確認していないが、N値を使用する限りにおいてはどうしてもばらつきがあるために、予測精度の大きな向上は期待できないと想像する。今後は、新しいサウンディング法の導入や、細粒分含有率以外のパラメータの導入なども必要である。そのためには、SCP工法の施工に際して、従来使用している土質調査項目以外の関連項目の追加とデータの蓄積が必要であると考えられる。

最後に、本研究の実施に際して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。また、本研究の一部は、みらい建設工業株式会社、復建調査設計株式会社、三信建設工業株式会社と実施した共同研究「低流動性材料を使用した静的圧入工法による液状化対策に関する研究」の成果の一部である。

(2005年5月13日受付)

## 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) 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.
- 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.
- 4) 山崎浩之，森川嘉之，小池二三勝：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，土木学会論文集，第722号/Ⅲ-61，pp. 303-314, 2002.
- 5) 山崎浩之，森川嘉之，小池二三勝：締固め砂杭工法による圧入後N値の予測と $K_0$ 値の影響に関する考察，土木学会論文集，第750号/Ⅲ-65，pp. 231-236, 2003.
- 6) 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.
- 7) Meyerhof, G. G.: Discussion of Session I, Proc. of 4th ICSMFE, London, Vol. 3, p. 110, 1957.
- 8) 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理解，土木学会論文集，第412号/Ⅲ-12，pp. 143-151, 1989.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 地盤工学会：土質工学ハンドブック，pp. 67-70, 1989.
- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) 古賀泰之，古関潤一，島津多賀夫，三原正哉，松原勝巳：動的貫入試験結果に及ぼす静止土圧係数 ( $K_0$ )

- 値)の影響, 第23回土質工学研究発表会講演集, pp. 107-108, 1988.
- 16) 安田進, 原田健二, 荒井大介, 風見健太郎, 佐藤貴紀, 杉本佳彦: 飽和地盤におけるN値と密度, 静止土圧係数の関係, 第35回地盤工学研究発表会講演集, pp. 1435-1436, 2000.
- 17) 運輸省港湾局: 港湾の施設の技術上の基準・同解説(上), 日本港湾協会, pp. 281-287, 1999.
- 18) 新坂孝志: 液状化対策としての静的圧入締固め工法に関する研究, 九州大学学位申請論文, p. 6, 2005.
- 19) 山崎浩之, 藤井照久, 小西武, 足立雅樹, 菊地将郎, 新坂孝志: 静的圧入締固め工法による改良後N値の予測に関する考察, 第39回地盤工学研究発表会講演集, pp. 1005-1006, 2004.

#### 記号表

- $G_M$ : パラメータ  
 $D_r$ : 相対密度  
 $e$ : 間隙比  
 $e_{max}$ : 最大間隙比  
 $e_{min}$ : 最小間隙比  
 $F_c$ : 細粒分含有率  
 $F_v$ : 圧入率  
 $k$ : 透水係数  
 $K_0$ : 静止土圧係数  
 $N$ : 標準貫入試験N値  
 $N_0$ : 圧入前の換算N値  
 $N_1$ : 圧入後の換算N値  
 $N_{65}$ : 等価N値  
 $N_{98}$ : 換算N値  
 $\alpha$ : パラメータ  
 $\varepsilon^*$ : 体積ひずみ  
 $\gamma^*$ : 累積せん断ひずみ  
 $\kappa$ : パラメータ  
 $\sigma_v'$ : 有効上載圧