

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

---

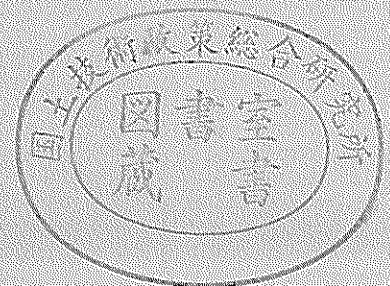
REPORT OF  
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH  
INSTITUTE

---

VOL.41    NO.2    June 2002

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 41 卷 第 2 号 (Vol. 41, No. 2), 2002 年 6 月 (June 2002)

## 目 次 (CONTENTS)

1. 複素主成分分析を用いた仙台湾蒲生干潟前面海浜地形の中期変動特性の解析  
..... 内山雄介・栗山善昭 ..... 3  
(A Complex Principal Component Analysis on Medium-term Morphological Behavior of an Exposed Sandy Beach before Gamo Lagoon at Sendai Coast, Japan  
..... Yusuke UCHIYAMA, Yoshiaki KURIYAMA)
2. 高潮推算に用いる台風の気圧と風の場に関する検討  
..... Albena Veltcheva・河合弘泰 ..... 23  
(Investigation of the Typhoon Pressure and Wind Field with Application for Storm Surge Estimation  
..... Albena VELTCHEVA, Hiroyasu KAWAI)
3. 大阪湾洪積粘土の構造の評価と力学特性  
..... 土田 孝・渡部要一・姜 敏秀 ..... 45  
(Evaluation of structure and mechanical properties of Pleistocene clay in Osaka Bay  
..... Takasi TSUCHIDA, Yoichi WATABE, Min-Soo KANG)
4. 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  
..... 山崎浩之・森川嘉之・小池二三勝 ..... 93  
(Study on Design Method for Densification of Sandy Deposits by Sand Compaction Pile Method  
..... Hiroyuki YAMAZAKI, Yoshiyuki MORIKAWA, Fumikatsu KOIKE)
5. 溶液型薬液注入工法の液状化対策への適用  
..... 山崎浩之・善 功企・河村健輔 ..... 119  
(Study on Applicability of Permeable Grouting Method to Countermeasure against Liquefaction  
..... Hiroyuki YAMAZAKI, Kouki ZEN, Kensuke KAWAMURA)
6. 難視界時の把持作業における拡張現実感 (AR) を用いた視界補完手法  
..... 内海 真・平林丈嗣・吉江宗生 ..... 153  
(Vision Supplement for Grasping in Unclear Underwater Using AR  
..... Makoto UTSUMI, Taketsugu HIRABAYASHI, Muneo YOSHIE)

# 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

山崎 浩之\*  
森川 嘉之\*\*  
小池 二三勝\*\*\*

## 要 旨

サンドコンパクションパイル工法は、密度増加による液状化対策工法の代表的な工法である。同工法の設計、すなわち圧入率（砂杭打設間隔）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。本報告では、最近我が国の港湾・空港において行われた液状化対策としてのサンドコンパクションパイル工法の実績を集め、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。検討結果は、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、サンドコンパクションパイル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。

キーワード：サンドコンパクションパイル工法， $N$  値，液状化対策，設計

\* 地盤・構造部動土質研究室長

\*\* 地盤・構造部主任研究官

\*\*\* 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 独立行政法人港湾空港技術研究所地盤・構造部動土質研究室  
電話：0468-44-5054 Fax：0468-44-0618 e-mail:yamazaki@pari.go.jp

## Study on Design Method for Densification of Sandy Deposits by Sand Compaction Pile Method

Hiroyuki YAMAZAKI \*  
Yoshiyuki MORIKAWA \*\*  
Fumikatsu KOIKE \*\*\*

### Synopsis

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.

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

---

\* Head, Soil Dynamics Division, Geotechnical & Structural Engineering Department  
\*\* Senior Researcher, Geotechnical & Structural Engineering Department  
\*\*\* Researcher, Soil Dynamics Division, Geotechnical & Structural Engineering Department  
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan  
Phone : +81-468-445054 Fax : +81-468-440618 e-mail:yamazaki@pari.go.jp

## 目 次

要 旨 .....	93
1. まえがき .....	97
2. 既存の設計法 .....	97
3. SCP工法による原地盤 $N$ 値の増加およびC法との比較 .....	97
3.1 改良前の原地盤 $N$ 値と増分 $N$ 値の関係 .....	97
3.2 細粒分含有率と増分 $N$ 値の関係 .....	99
3.3 圧入率と増分 $N$ 値の関係 .....	100
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 .....	101
4.1 SCP工法の $N$ 値増加の考え方 .....	102
4.2 新しい締固めメカニズム .....	103
4.3 新しい $N$ 値増加の予測法 .....	106
4.4 提案手法の実測地による確認 .....	112
5. 考察 .....	112
5.1 提案手法とC法の比較 .....	112
5.2 砂杭打設による地盤の盛り上がりについて .....	115
5.3 係数 $k$ について .....	115
6. 結論 .....	116
7. あとがき .....	117
謝辞 .....	117
参考文献 .....	117
付録 .....	118

## 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>。

本報告では最近約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値の拘束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い。

そこで本報告においては、既存設計法によるN値の予測はC法を検討の対象とする。

## 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で30%以下の土層だからである。

### 3.1 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値の増分の関係を、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。C法による予測については付録を参照されたい。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型近似したものである。

ここで、換算N値とは有効鉛直圧力が $98\text{kN/m}^2$ に補正されたN値で次式により定義され、以降N値は換算N値で取り扱う。

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

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。

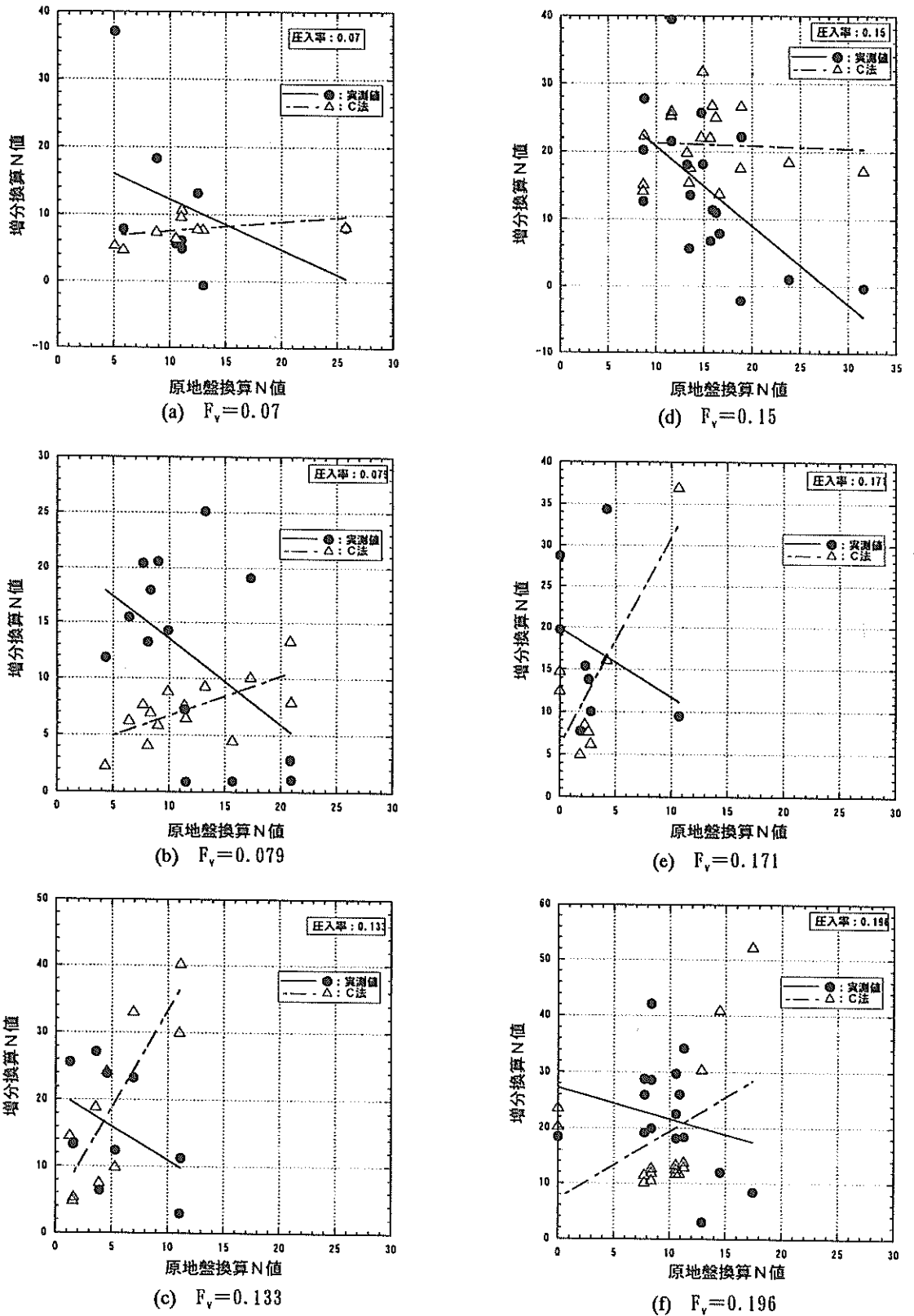


図-1 各圧入率  $F_v$  に対する原地盤換算N値と増分換算N値の関係

3.2 細粒分含有率と増分N値の関係

図-2は圧入率ごとに、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

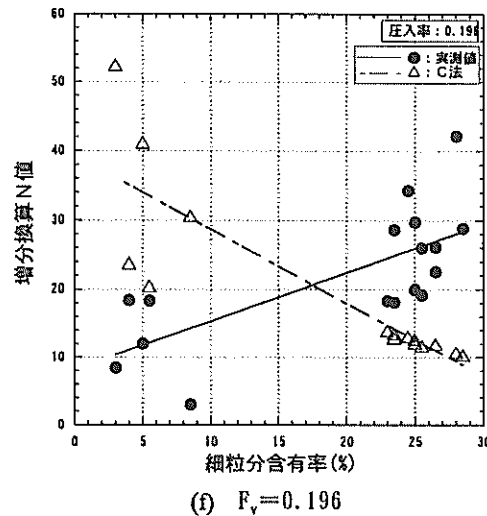
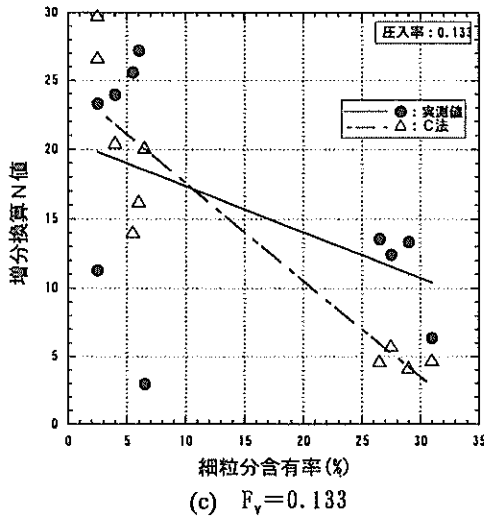
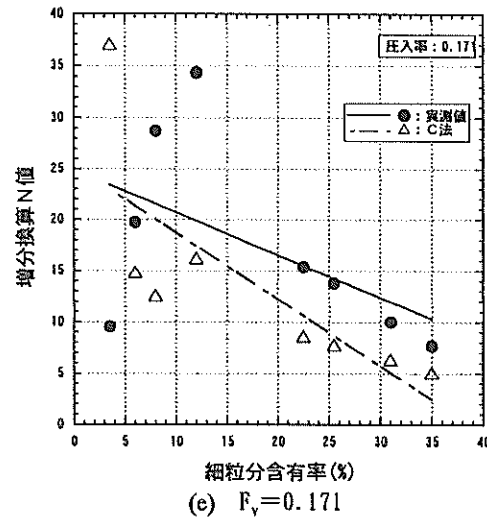
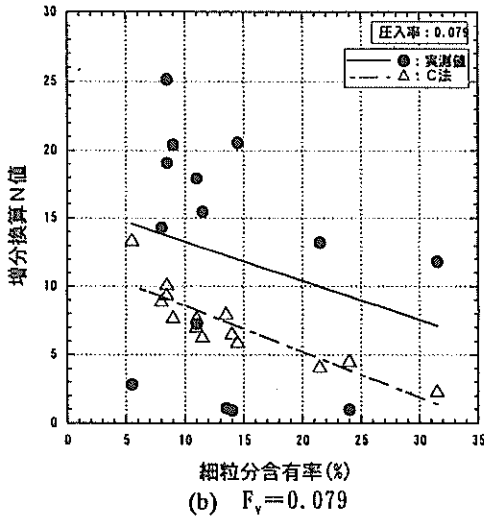
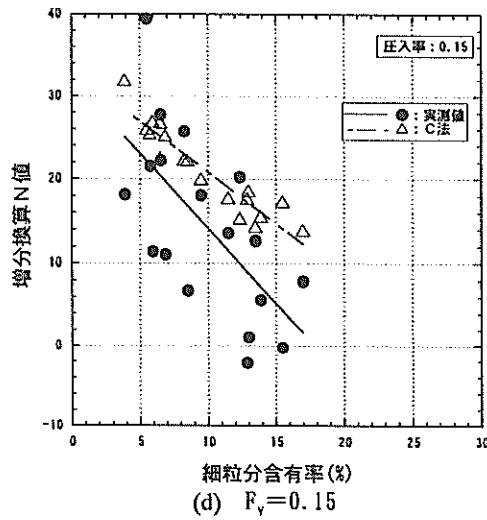
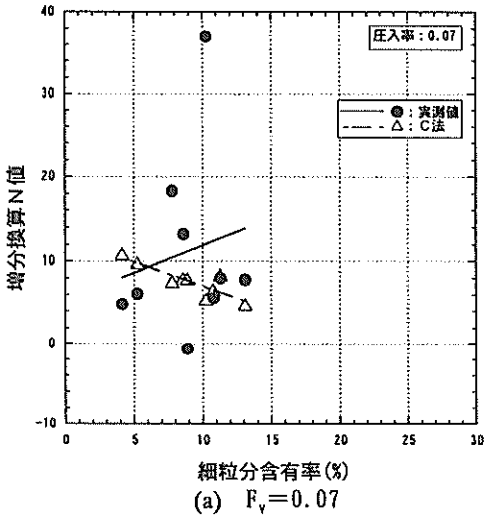


図-2 各圧入率  $F_v$  に対する細粒分含有率と増分換算N値の関係



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。

### 3.3 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には線型回帰による各プロットの近似線を示す

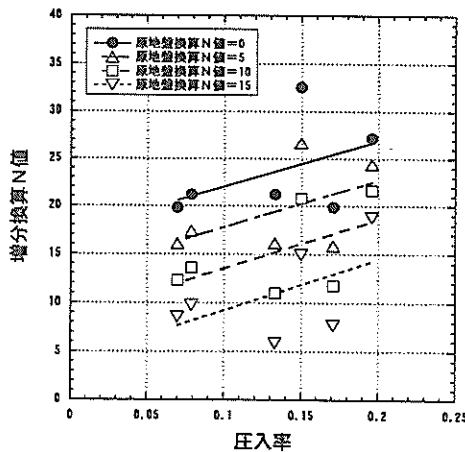
図-3(a), (b)の各プロットは、図-3(b)の細粒分含有率が30%のものを除くと、いずれの場合も圧入率とともに増分換算N値が大きくなる関係がある。

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

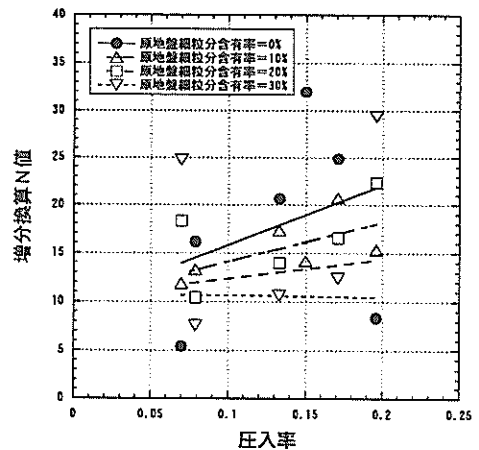
は少ないといえる。

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、このことは、3.1で述べたことと合わせて、C法の抱える問題点として指摘される。

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。



(a) 原地盤換算N値の影響



(b) 細粒分含有率の影響

図-3 圧入率と増分換算N値の関係 (実測値)

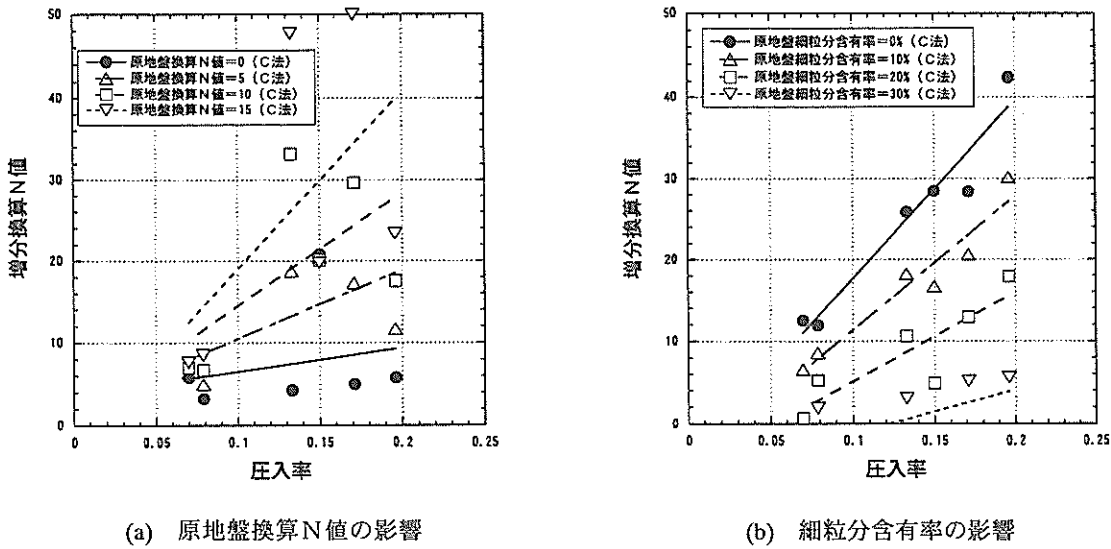


図-4 圧入率と増分換算N値の関係 (C法による予測値)

#### 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が示された。これは、以下で述べるように、C法で仮定され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。

##### 4.1 SCP工法のN値増加の考え方

SCP工法のN値増加は、①砂杭の圧入による杭間の密度(相対密度)の増加、②相対密度の増加によるN値の増加という2つの部分から説明される。2章で用いられたC法による増分N値の予測法、あるいはB法も大まかにはこの2つの部分からなっている。ここで、②については単にN値と相対密度の関係ということで、これまでにいくつかの経験式が提案されている。前述したように、B法ではGibbs-Holtzの相対密度-N値-有効上載圧の関係、C法ではMeyerhofのN値と相対密度の関係式が用いられている。これらN値と相対密度の関係は経験式であり、ある程度の誤差は当然含まれている。①がSCP工法、あるいは類似の締固め工法の本質に関わる部分で、すなわち、砂杭をどの程度圧入すれば杭間がどの程度締まるかという関係である(こういう意味では、②の部分は単に地盤調査であって、N値に代わる手法があれば、それと相対密度との関係で良いのである)。

以上のような観点でC法あるいはB法を考察すると、

①については、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。このようなメカニズムを仮定することは、厳密ではないが大まかにいえば、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。②について考察すると、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、同じ相対密度の増加に対しては原地盤N値が大きい方が大きなN値の増分になることを意味している。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。さらに、砂はその定義から最小間隙比以下の間隙比にはなりえないのである。しかし、図-5(a)のようなメカニズムを仮定していることから、間隙はゼロになるまで圧入される砂杭と等しい量が締め固まることになる。このようなことから、C法を用いると、N値の大きな領域で圧入率を大きくすると、通常考えられない増分N値を算定することになる。このように、図-5(a)で示されるようにC法で仮定されている締固めメカニズムは土が本来有している力学挙動を正しく表現できていないといえる。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。

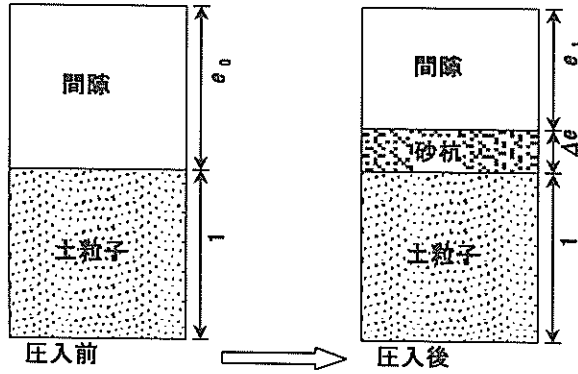


図-5(a) 既往の方法の圧縮メカニズム

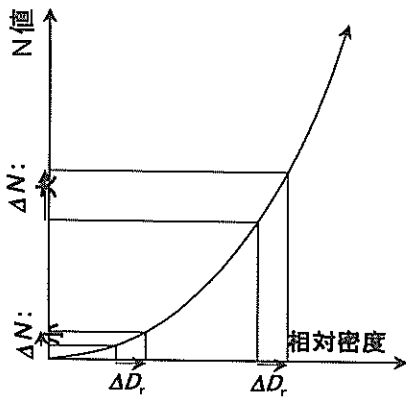


図-5(b) 既往の方法で用いられている相対密度と N 値の関係

#### 4.2 新しい締固めメカニズム

Tsukamotoら<sup>8)</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>8)</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。

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>9)</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、ダイレイタンスが、繰返しせん断ひずみ成分に起因した

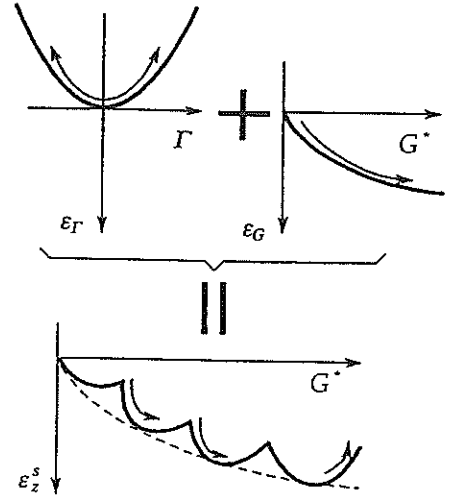


図-6 「おわんモデル」の概念<sup>9)</sup>

ものと、累積せん断ひずみ成分に起因したものの重ね合わせとして表されている。

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

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

ここに、 $\varepsilon_z^s$ はダイレイタンスによる体積ひずみ、 $\varepsilon_r$ は繰返しせん断ひずみによるダイレイタンス、 $\varepsilon_g$ は累積せん断ひずみによるダイレイタンス、 $\tau$ は繰返しせん断ひずみ、 $G^*$ は累積せん断ひずみ、 $A, B, C, D$ は係数である。

繰返しせん断ひずみによるダイレイタンスは、荷重-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。累積せん断ひずみによるものは、累積せん断ひずみととも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。

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

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。

式(4)では式(3)の繰返しせん断によるダイレイタンスを無視したが、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。砂杭の圧入が外力になるので、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。

$$\gamma' = f(F_v) \quad (5)$$

$$= \kappa_0 F_v + \gamma'_{i0} \quad (6)$$

ここに、 $\kappa_0$ は比例係数、 $F_v$ は圧入率、 $\gamma'_{i0}$ 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 $\gamma'_{i0}$ があるのは、砂杭の圧入率がゼロでも杭間の体積圧縮ひずみは必ずしもゼロではないからである。このようなことから、 $\gamma'_{i0}$ には原地盤の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。

#### 4.3 新しい $N$ 値増加の予測法

前節4.2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。予測法は既に述べたように、①圧入による体積圧縮に伴う相対密度の変化を予測する圧入率と相対密度の関係、② $N$ 値と相対密度の関係の2つの部分からなっている。

##### (1) 圧入率と相対密度の関係の提案

相対密度 $D_r$ は下式で定義されるものである。

$$D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \quad (7)$$

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(4)の杭間の体積ひずみ $\varepsilon'$ は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \varepsilon' &= \frac{\Delta e}{1 + e_{max}} \\ &= \frac{e_{max} - e}{1 + e_{max}} \end{aligned} \quad (8)$$

式(4)、(6)、(8)から、式(7)は次式になる。

$$D_r = \frac{c_2}{c_1} \frac{\kappa_0 F_v + \gamma'_{i0}}{a + b(\kappa_0 F_v + \gamma'_{i0})} \quad (9)$$

$$c_1 = e_{max} - e_{min} \quad (10)$$

$$c_2 = 1 + e_{max} \quad (11)$$

式(9)で累積せん断ひずみ( $\gamma' = \kappa_0 F_v + \gamma'_{i0}$ )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。

$$b = \frac{c_2}{c_1} \quad (12)$$

ここで、式(12)を式(9)に代入する。そして、定数 $a$ については、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が、定数 $a$ を特に決定する必要はなく、式(9)右辺の分母と分子を $a$ で割って変形すると次式が得られる。

$$D_r = \frac{\kappa F_v + \gamma'_i}{c_1/c_2 + (\kappa F_v + \gamma'_i)} \quad (13)$$

ここに、 $\kappa = \kappa_0/a$ 、 $\gamma'_i = \gamma'_{i0}/a$ である。

したがって、圧入率と累積せん断ひずみの関係を線型関係で近似する2つのパラメータ、 $\kappa$ と $\gamma'_i$ が定められれば、圧入率から相対密度を予測できる。これらのパラメータは理論的に算出するのは難しく、実験的に算出する必要があり、後述の(3)、(4)、(6)で示されるように経験的な手法で定められる。

##### (2) $N$ 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の式が用いられていたが、ここではMeyerhofの式に加え、最近の知見を取り入れた下式も用いる。

$$N_i = A_1 (D_r - D_{r0}) \quad (14)$$

ここで、式(14)は図-7に示される吉見が $N$ 値と相対密度

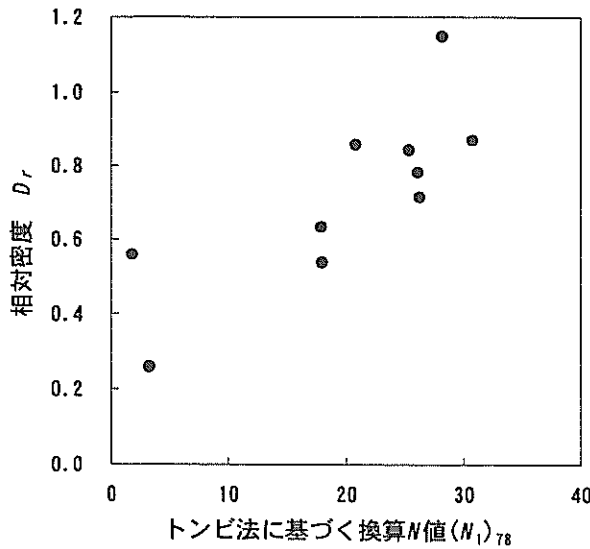


図-7 原位凍結試料の相対密度と換算N値の関係<sup>10)</sup>

について整理した関係<sup>10)</sup>を、相対密度の上限を $D_r = 1.0$ として線型近似したもので、 $A_1$ は勾配、 $D_{r0}$ は $N_1$ がゼロの場合の相対密度に対応する。ここでは、 $A_1$ を50、 $D_{r0}$ を0.3として近似する。なお、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、通常のサンドサンプリングより得られる相対密度よりも高い精度がある。

MeyerhofのN値と相対密度の関係式は以下のとおりである。

$$D_r = 0.16\sqrt{N_1} \quad (15)$$

(3) 相対密度とN値の関係を式(14)とした場合の圧入率と杭間N値の関係

式(9)と式(14)より圧入率と杭間N値の関係は下式で表される。

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

$\gamma_i^*$ は式(16)に圧入前の原地盤換算N値： $N_{1i}$ を代入し圧入率 $F_v=0$ として下式で算定される。

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

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 $\kappa$ が定めれば、圧入率、圧入前の原地盤換算N値、最大間隙比、最小間隙比を与えることにより、圧入後の杭間換算N値が、(10)、(11)、(16)、(17)から求まることになる。 $\kappa$ の決定については(6)で後述される。

(4) 相対密度とN値の関係を式(15)とした場合の圧入率と杭間N値の関係

式(13)と式(15)より圧入率と杭間N値の関係は下式で表される。

$$N_1 = A_2 \left( \frac{\kappa F_v + \gamma_i^*}{c_1/c_2 + (\kappa F_v + \gamma_i^*)} \right)^2 \quad (18)$$

ここに、 $A_2 = (1/0.16)^2$ である。

$\gamma_i^*$ は式(18)に圧入前の原地盤換算N値： $N_{1i}$ を代入し圧入率 $F_v=0$ として、下式で算定される。

$$\gamma_i^* = \frac{\sqrt{N_{1i}/A_2}}{(c_2/c_1)(1 - \sqrt{N_{1i}/A_2})} \quad (19)$$

以上から、この場合も、定数 $\kappa$ が定めれば、圧入率、圧入前の原地盤換算N値、最大間隙比、最小間隙比を与えることにより、圧入後の杭間換算N値が、(10)、(11)、(18)、(19)から求まることになる。 $\kappa$ の決定については(6)で後述される。

(5) 最大間隙比と最小間隙比

パラメータ $c_1$ 、 $c_2$ を決定するためには、対象土の最大間隙比と最小間隙比が必要である。最大間隙比と最小間隙比は対象地盤から試料を採取し、室内で最大、最小密度試験を行うことにより容易に求めることができる。しかし、後述されるようにパラメータ $\kappa$ は既存のSCP工法のデータを基に設定され、それらは最大・最小密度試験データを有していない。このようなことから、ここでは、C法と同じように、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>11)</sup>を利用し、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。

$$e_{\max} = 0.02F_c + 1.0, \quad (20)$$

$$e_{\min} = 0.6. \quad (21)$$

ここに、 $F_c$ は細粒分含有率%である。

(6) 係数  $\kappa$  の決定

(3), (4)において、新しく提案した締固め機構に基づいた圧入率と $N$ 値の関係式を、相対密度と $N$ 値の関係式(14)とした場合、および、式(15)とした場合について、それぞれ式(16)、および式(18)が誘導された。ここでは、各式中の係数  $\kappa$  を決める。 $\kappa$ は前述したように、圧入率 $F_v$ と累積せん断ひずみを関連づけるための係数である。これを室内試験などで求めることは現時点では困難であるので、下記のように既存のSCP工法のデータを利用して算定する。

a) 吉見のデータによる式(14)を用いた場合  
式(16)から $\kappa$ は下式で表される。

$$\kappa = \frac{(c_2/c_1)\gamma_i \{1/(N_1/A_1 + D_{10}) - 1\} - 1}{(c_2/c_1)F_v \{1 - 1/(N_1/A_1 + D_{10})\}}. \quad (22)$$

以上から、SCP施工前後の $N$ 値、細粒分含有率があれば、式(17)と(22)から、 $\kappa$ は求めることができる。ここでは、前章で示された現場のSCP施工前後のデータを用いて $\kappa$ を算出する。ここで、吉見のデータに基づく式(17)と(22)の場合には、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(22)の分母が小さな値となり、分子に含まれる実測値のバラツキが大きくなるとして反映される。したがって、圧入後の換算 $N$ 値が30以下のものを対象に、 $\kappa$ を式(17)と(22)により調べる。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する。

図-8は吉見のデータに基づく式(17)と(18)の場合の $\kappa$ と圧入率の関係で、実線は線型回帰したものである。図-8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の範囲でばらつき圧入率にあまり関係なく、平均的には $\kappa$ は5程度の値である。

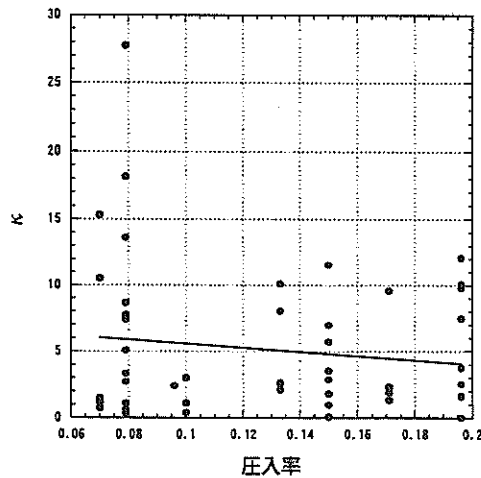


図-8  $\kappa$ と圧入率の関係(吉見)

b) Meyerhofによる式(18)を用いた場合  
式(18)から $\kappa$ は下式で表される。

$$\kappa = \frac{(c_2/c_1)\gamma_i \{1 - \sqrt{N_1/A_2}\} - \sqrt{N_1/A_2}}{(c_2/c_1)F_v (\sqrt{N_1/A_2} - 1)}. \quad (23)$$

以上から、SCP施工前後の $N$ 値、細粒分含有率があれば、式(19)と(23)から、 $\kappa$ は求めることができ、前述のa)と同様に $\kappa$ を算出する。また、a)と同様に、Meyerhofの式に基づく式(19)と(23)の場合には、圧入後の換算 $N$ 値が39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(18)が適用範囲を超え、換算 $N$ 値が39に近い場合には、式(23)の分母が小さな値となり、分子に含まれる実測値のバラツキが大きくなるとして反映される。したがって、a)と同様に、圧入後の換算 $N$ 値が30以下のものを対象に、 $\kappa$ を式(17)と(22)、式(19)と(23)により調べ、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する。

図-9はMeyerhofの式に基づく式(17)と(18)の場合の $\kappa$ と圧入率の関係である。図-9からこの場合も $\kappa$ 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の範囲でばらつき圧入率にあまり関係なく、吉見のデータの場合と同様に平均的には $\kappa$ は5程度の値である。

以上a)およびb)から、ここでは $\kappa$ の値として $\kappa=5$ を提案する。

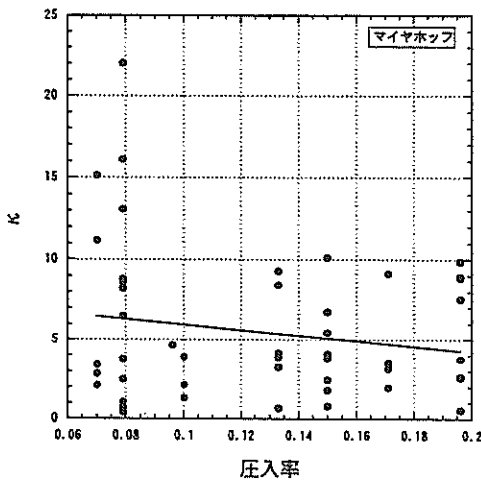


図-9 κと圧入率の関係(Meyerhof)

4.4 提案手法の実測値による確認

新しい締固めメカニズムに基づき圧入率から圧入後のN値を予測する手法を提案したが、相対密度とN値の関係式の違いから、2種類の予測手法が提案された。それぞれ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： $F_c$  (%)、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。

相対密度とN値の関係が式(14)の場合：

$$N_1 = A_1 \left( \frac{c_2}{c_1} \frac{\kappa F_v + \gamma_i^*}{1 + (c_2/c_1)(\kappa F_v + \gamma_i^*)} - D_{10} \right), \quad (16)$$

$$\gamma_i^* = \frac{N_{1i}/A_1 + D_{10}}{(c_2/c_1)\{1 - (N_{1i}/A_1 + D_{10})\}}, \quad (17)$$

$$c_1 = e_{\max} - e_{\min}, \quad (10)$$

$$c_2 = 1 + e_{\max}, \quad (11)$$

$$e_{\max} = 0.02F_c + 1.0, \quad (20)$$

$$e_{\min} = 0.6. \quad (21)$$

ここに、 $A_1 = 50$ 、 $D_{10} = 0.3$ 、 $\kappa = 5$ である。

相対密度とN値の関係が式(15)の場合：

$$N_1 = A_2 \left( \frac{\kappa F_v + \gamma_i^*}{c_1/c_2 + (\kappa F_v + \gamma_i^*)} \right)^2. \quad (18)$$

$$\gamma_i^* = \frac{\sqrt{N_{1i}/A_2}}{(c_2/c_1)(1 - \sqrt{N_{1i}/A_2})}. \quad (19)$$

$$c_1 = e_{\max} - e_{\min}, \quad (10)$$

$$c_2 = 1 + e_{\max}, \quad (11)$$

$$e_{\max} = 0.02F_c + 1.0, \quad (20)$$

$$e_{\min} = 0.6. \quad (21)$$

ここに、 $A_2 = (1/0.16)^2$ で、 $\kappa = 5$ である。

ここで、いずれの場合も $\kappa$ の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。

以下では、3章で示された実測値と提案手法を比較する。

(1) 増分換算N値と原地盤換算N値および細粒分含有率の関係

図-10、図-11は3章で示された増分換算N値と原地盤換算N値関係の実測値と2つの提案手法による予測値の比較、図-12、図-13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-10、図-11から原地盤換算N値が増加すると、増分換算N値が減少しており、どちらの予測値も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はほぼ対応している。 $\kappa$ 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、2つの手法による予測値はいずれも実測値をほぼ説明できるといえる。

図-12、図-13の増分換算N値と細粒分含有率関係についての実測値と予測値の比較では、圧入率0.07、0.079と0.196のものは、線型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。これは、3章のC法と実測値の比較で述べたことと同様である。その他の圧入率については、どちらの提案手法とも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-10、図-11において圧入率が $F_v = 0.196$ の実測値に対しては、いずれの提案手法( $\kappa = 5$ )も増分換算N値をかなり過小評価している。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(14)、(15)には換算N値の上限値 $N_1 = 35$ 、 $39$ 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、実務上安全側の評価につ

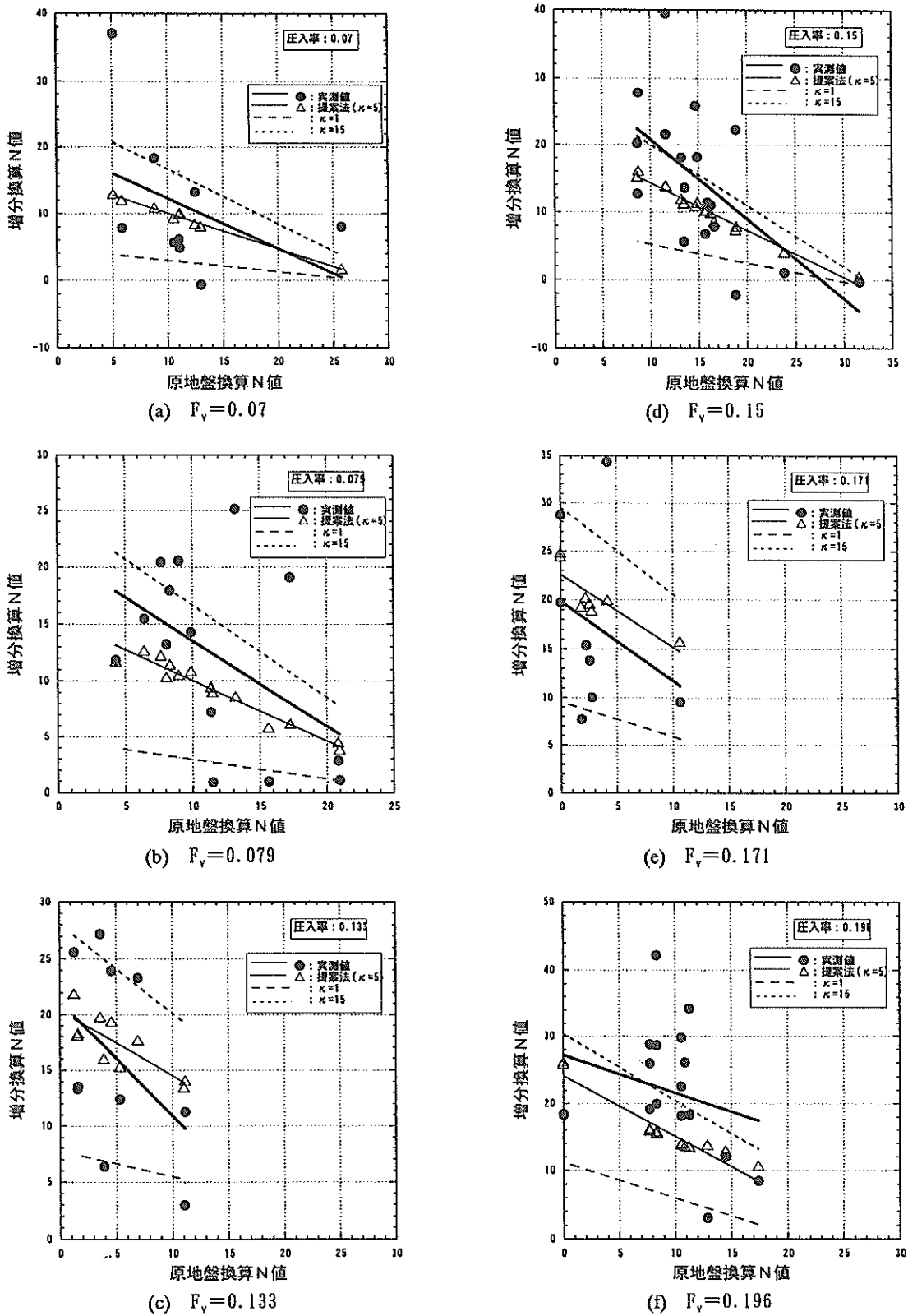


図-10 吉見のデータに基づく提案手法による原地盤換算N値と増分換算N値の関係



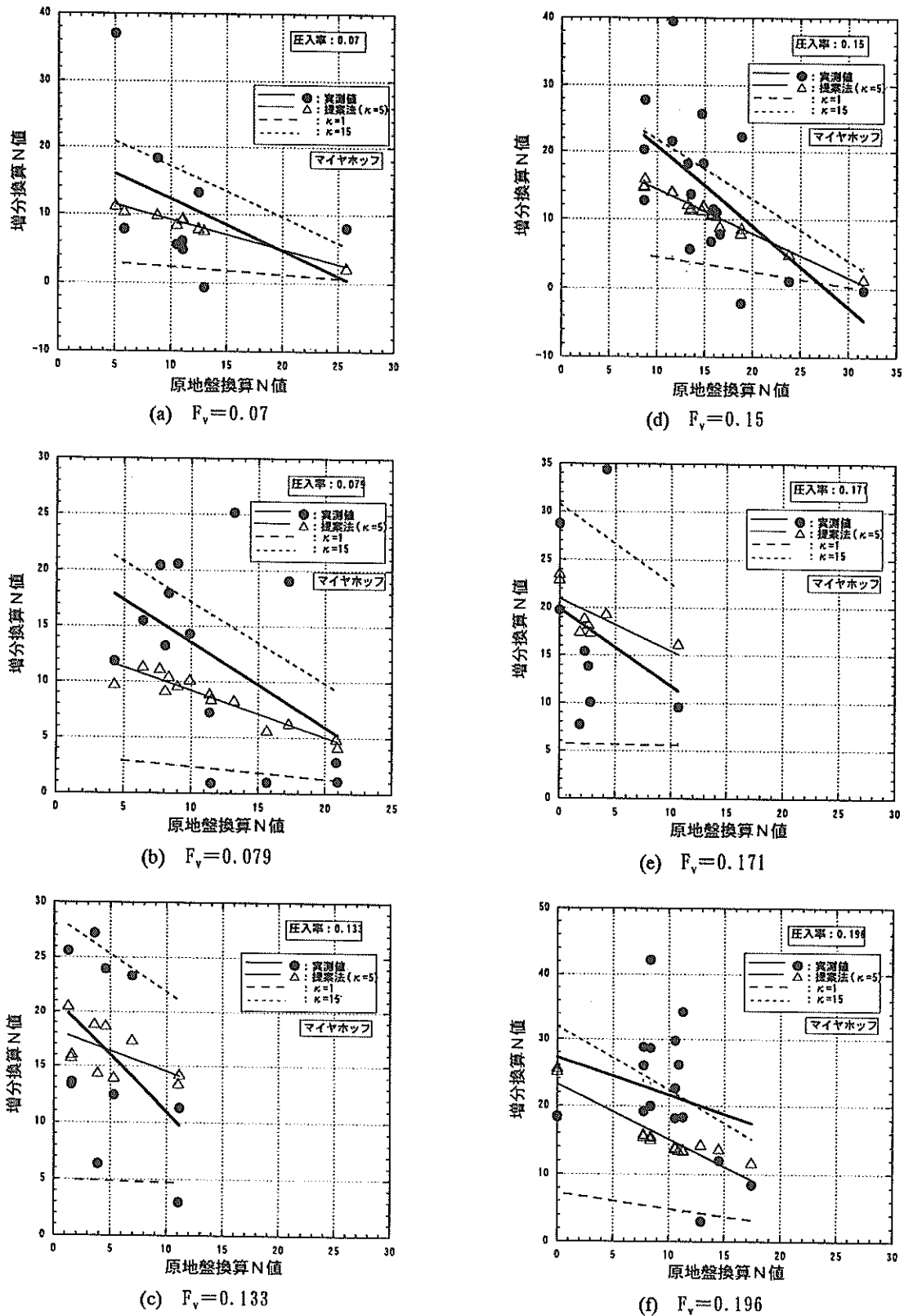


図-11 Meyerhof の式に基づく提案手法による原地盤換算N値と増分換算N値の関係

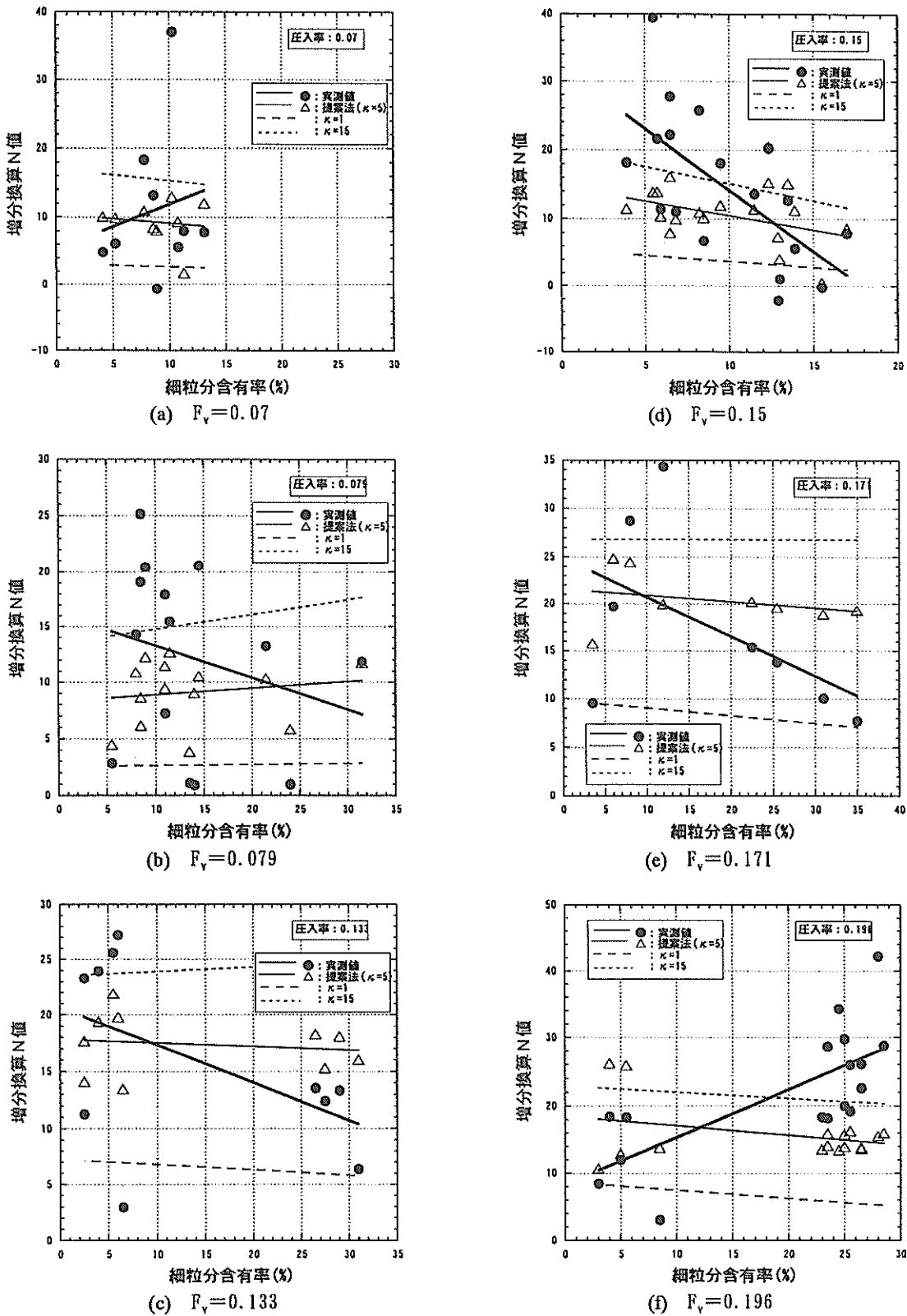


図-12 吉見のデータに基づく提案手法による細粒分含有率と増分換算N値の関係

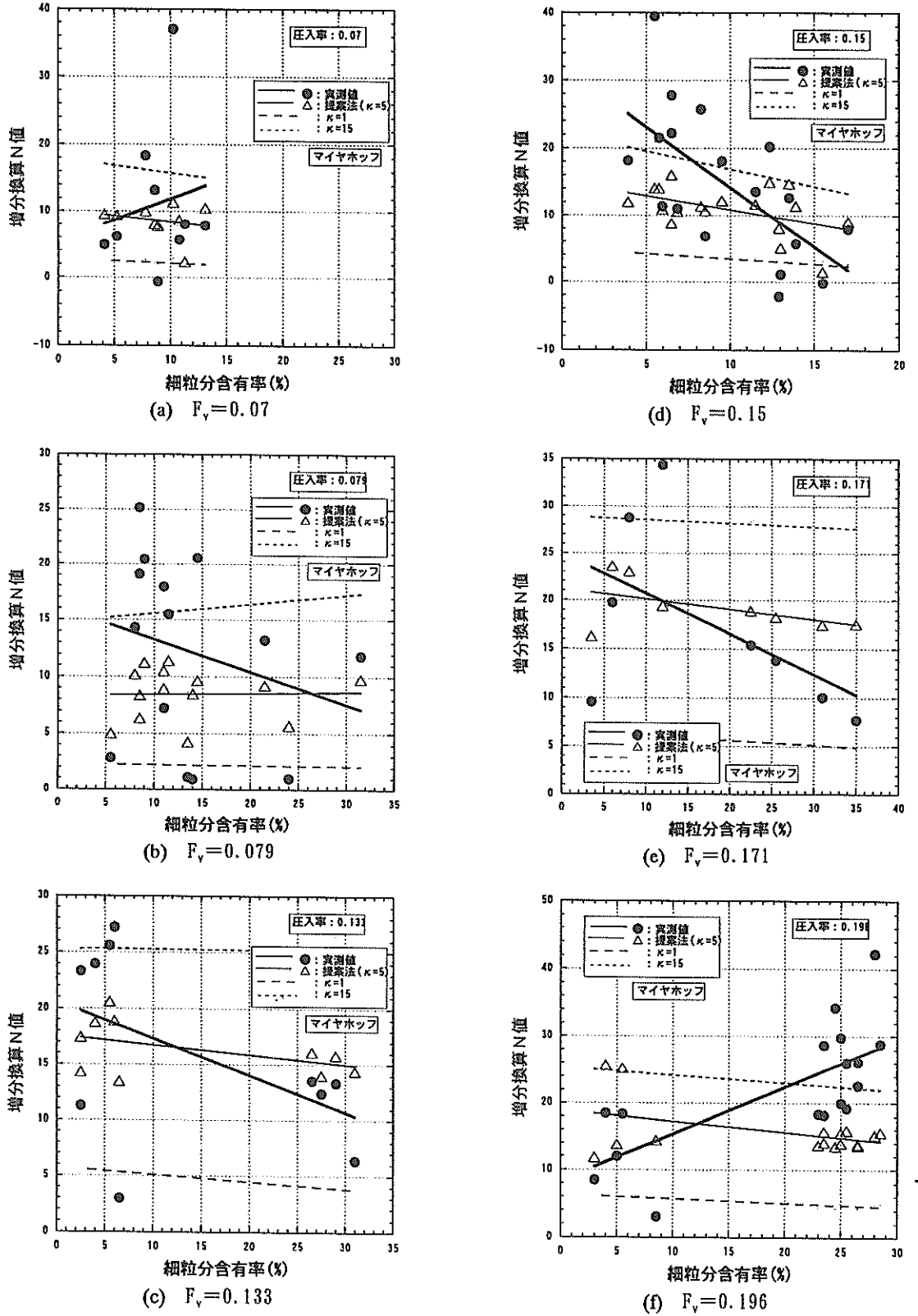


図-13 Meyerhof の式に基づく提案手法による細粒分含有率と増分換算N値の関係

ながるので特に大きな問題とは考えない。

また、図-10、図-11のいずれにおいても圧入率が $F_v=0.171$ 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、提案手法には細粒分含有率の増分換算 $N$ 値(相対密度の増加)に及ぼす影響が考慮されていないためである。

(2) 増分換算 $N$ 値と圧入率の関係

2つの提案予測手法による増分換算 $N$ 値と圧入率の関係を、図-14、図-15は原地盤換算 $N$ 値をパラメータとして、図-16と図-17は細粒分含有率をパラメータとして調べたものである。

図-14、図-15より、原地盤換算 $N$ 値をパラメータとした場合、いずれの提案手法も圧入率が大きくなると増分換算 $N$ 値が大きくなり、また、原地盤換算 $N$ 値が小さい方

が増分換算 $N$ 値は大きくなっている。このことは、3章の図3(a)示された実測値の傾向と全く同じである。

図-16、図-17から、細粒分含有率をパラメータとした場合にも、いずれの提案手法も圧入率が大きくなると増分換算 $N$ 値は大きくなり、3章の図-3(b)で示された実測値の傾向と一致している。また、細粒分含有率が大きくなると線型回帰した直線は、グラフの下の方になりこの傾向も一致している。しかし、提案手法の方が各直線は密に集まっており、また、細粒分含有率が30%の場合には図-3(b)で示されたように実測値は圧入率が大きくなっても増分換算 $N$ 値の値はほぼ一定であったが提案手法によるものは増加している。このように、提案手法によるものは、実測値ほど細粒分含有率の影響が増分 $N$ 値に関して大きく現れていない。この原因は、図-12、図-13の各提案手法による予測値と実測値の比較で述べたことと

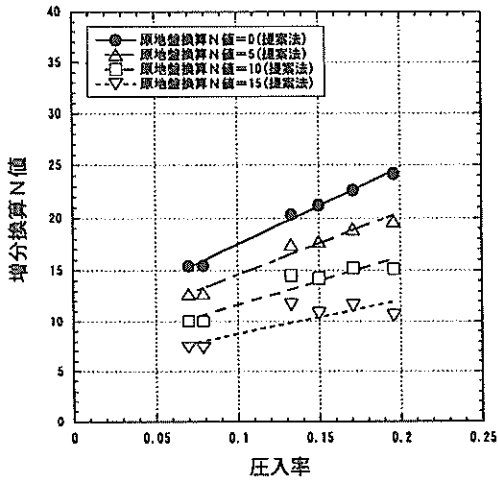


図-14 原地盤 $N$ 値ごとの圧入率と増分 $N$ 値の関係

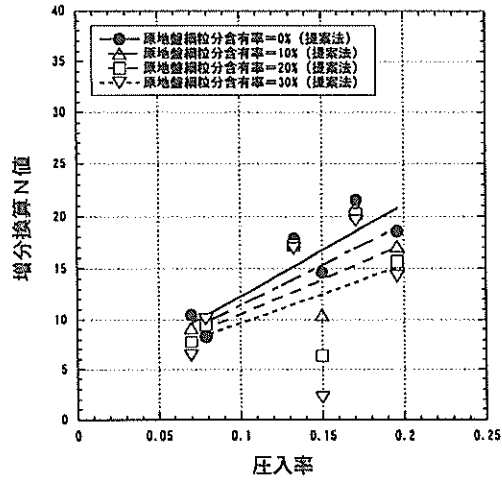


図-16 細粒分含有率ごとの圧入率と増分 $N$ 値の関係

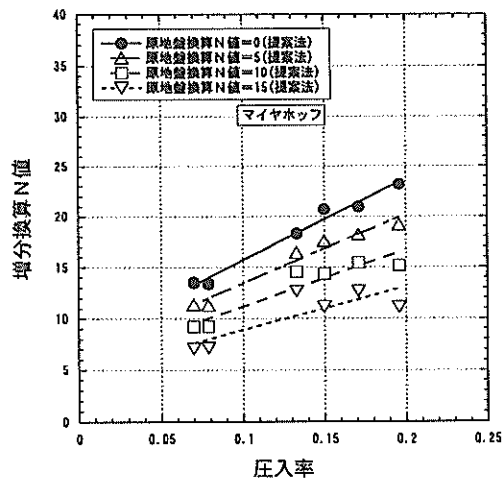


図-15 原地盤 $N$ 値ごとの圧入率と増分 $N$ 値の関係 (Meyerhof)

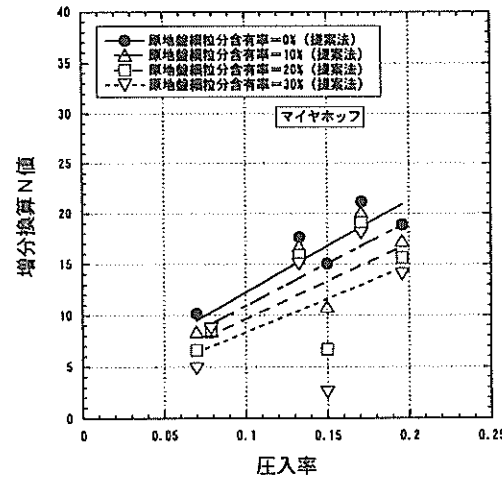


図-17 細粒分含有率ごとの圧入率と増分 $N$ 値の関係 (Meyerhof)

同じ理由で、相対密度の増加に及ぼす細粒分含有率の影響が考慮されていないからであると説明される。

以上から、2つの提案手法は、ともに原地盤換算 $N$ 値をパラメータとした場合には実測値の傾向と良く一致していた。しかし、細粒分含有率をパラメータとした場合には、細粒分含有率の増分換算 $N$ 値におよぼす影響を過小評価しているといえる。

## 5. 考察

### 5.1 提案手法とC法の比較

ここでは、4章で提案された2つの増分 $N$ 値の予測手法、および従来からの予測手法であるC法を比較して考察する。比較は、提案手法に増分 $N$ 値に関する細粒分補正がないことから、細粒分含有率が $F_c=0\%$ の地盤について行う。ここで、C法の細粒分含有率に関する $N$ 値の補正係数は、付録に示されるように $F_c=0\%$ の場合1.0となり、提案手法において細粒分補正がないことと同じになる。また、提案手法とC法においては最小間隙比の推定式に若干の違いがあるが(式(10)と付録の式(A3))、 $F_c=0\%$ としたので、最小間隙比は同じ値となる。以上のように、細粒分含有率を $F_c=0\%$ とすることにより、提案手法とC法の整合性のとれた比較ができる。

#### (1) 原地盤換算 $N$ 値と増分換算 $N$ 値関係の比較

図-18は、圧入率が $F_v=0.01, 0.03, 0.07, 0.10, 0.15, 0.20$ の場合の原地盤換算 $N$ 値と増分換算 $N$ 値の関係を、2つの提案手法、C法について比較したものである。●プロットがC法、△が式(14)の相対密度と $N$ 値の関係を用いた提案手法、□が式(15)の相対密度と $N$ 値の関係を用いた提案手法のものである。提案手法のうち、□プロットのもはC法と同じMeyerhofの相対密度と $N$ 値の関係を用いているので、□と●の違いが新しく提案した締固めメカニズム(図-6)とC法で仮定されているメカニズム(図-5(a))の直接的な違いである。

図-18から、圧入率が $F_v=0.15$ 以下の場合に原地盤換算 $N$ 値が小さいところでは提案手法の方がC法よりも大きな増分換算 $N$ 値を与え、それ以外ではC法の方が大きな増分換算 $N$ 値を与えることがわかる。次に、C法によるものは原地盤換算 $N$ 値が大きくなるほど、増分換算 $N$ 値は大きくなり、計算上は増分換算 $N$ 値に上限がない。しかし、2つの提案手法では原地盤換算 $N$ 値が大きくなると増分換算 $N$ 値は小さくなり、増分換算 $N$ 値に上限があり、C法とは全く逆の傾向である。提案手法に上限があるのは、提案手法は締固めメカニズムをせん断によるダイレイタ

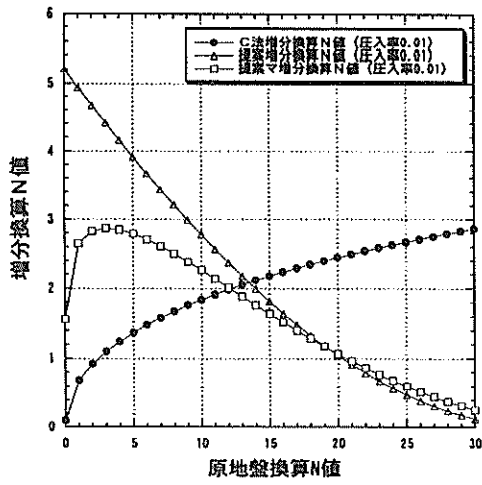
ンシーに基づかせ、体積変化を式(4)で示した双曲線関数で表しているためである。逆にC法は圧入された体積だけ地盤は圧縮するとしているため計算上、上限がなくなるのである。

提案手法どうしを比較すると、相対密度と $N$ 値の関係をMeyerhofの式の式(15)としたものは、吉見のデータに基づいた式の式(14)としたものより、原地盤換算 $N$ 値が小さいところで小さめの増分換算 $N$ 値を与えている。これは、式(14)と式(15)を比較すると、換算 $N$ 値が小さいところでは相対密度の増加に対して換算 $N$ 値の増加は式(14)の方が大きいからである。逆に、換算 $N$ 値が大きいところでは、式(15)によるものが大きめの増分換算 $N$ 値を与えているが、これは式(15)の方は換算 $N$ 値が大きいところでは相対密度の増加に対して換算 $N$ 値の増加が大きいことと、上限の換算 $N$ 値が大きいからである。また、式(14)によるものは原地盤換算 $N$ 値が大きくなると増分換算 $N$ 値は単調に低下するが、式(15)によるものは、圧入率が小さい( $F_v=0.01, 0.03, 0.07$ )場合に原地盤換算 $N$ 値の小さいところで増分換算 $N$ 値は増加して極大値を示しその後低下する。この違いは、式(14)の相対密度と $N$ 値の関係は線型であるが、式(15)のものは放物線になっていることによる。しかし、以上の提案手法どうしの比較において、圧入率が $F_v=0.10$ より大きい場合や、原地盤換算 $N$ 値が大きいところでは、両者に大きな違いはみられず、式(7)と式(7b)のどちらを採用するかはそれほど重要と思われない。むしろ、式(14)あるいは式(15)などで表される相対密度と $N$ 値の関係式において $N$ 値の上限値、すなわち $A1, A2$ がいくつに設定されるかが大きく影響すると考えられる。

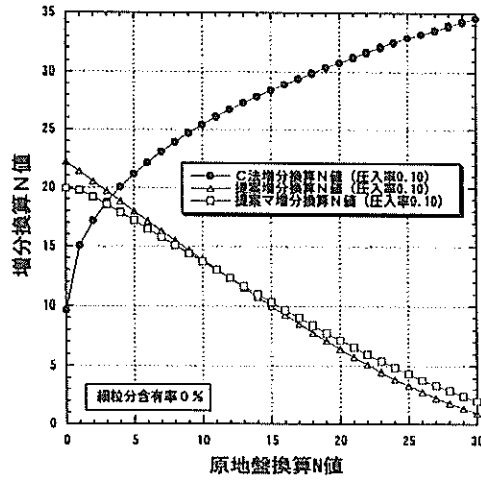
#### (2) 圧入率と増分換算 $N$ 値関係の比較

図-19は、原地盤換算 $N$ 値が $N_{11}=0, 5, 10, 15, 20, 25$ の場合の圧入率と増分換算 $N$ 値の関係を、2つの提案手法、C法について比較したものである。

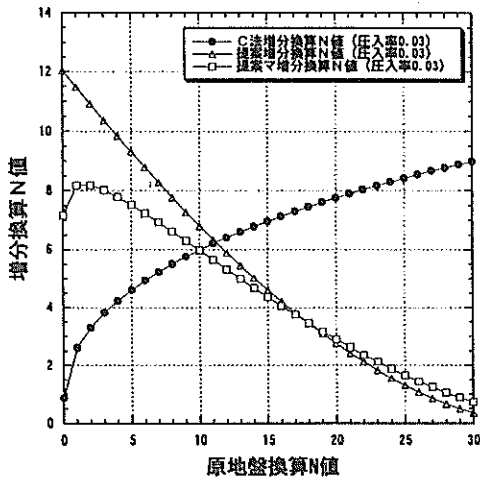
図-19から、原地盤換算 $N$ 値が $N_{11}=10$ より小さい場合に圧入率が小さいところでは提案手法の方が大きな増分換算 $N$ 値を与え、それ以外の場合にはC法の方が大きな増分換算 $N$ 値を与えることがわかる。次に、C法によるものは圧入率が大きくなるほど、増分換算 $N$ 値は大きくなり、(1)で述べたことと同じく計算上は増分換算 $N$ 値に上限がない。そして、2つの提案手法の方では圧入率が大きくなると増分換算 $N$ 値は小さくなり、増分換算 $N$ 値に上限があり、C法とは全く逆の傾向である。このようになる原因は、(1)で述べた理由と同じである。



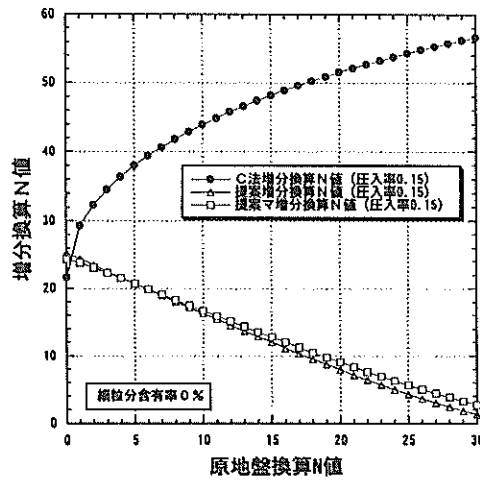
(a)  $F_v=0.01$



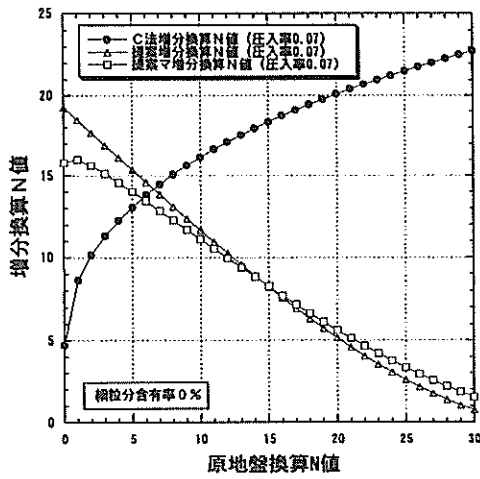
(d)  $F_v=0.10$



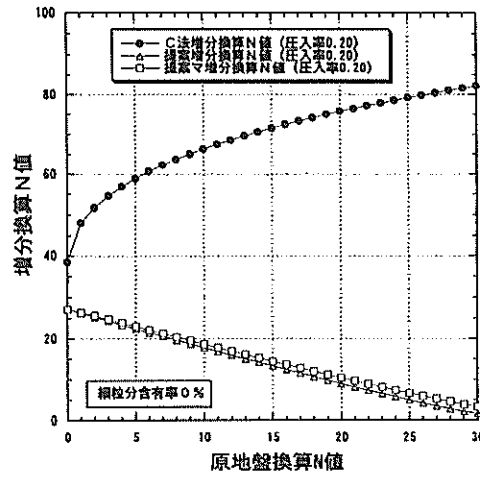
(b)  $F_v=0.03$



(e)  $F_v=0.15$



(c)  $F_v=0.07$



(f)  $F_v=0.20$

図-18 各圧入率における2つの提案手法およびC法による原地盤換算N値と増分換算N値の関係

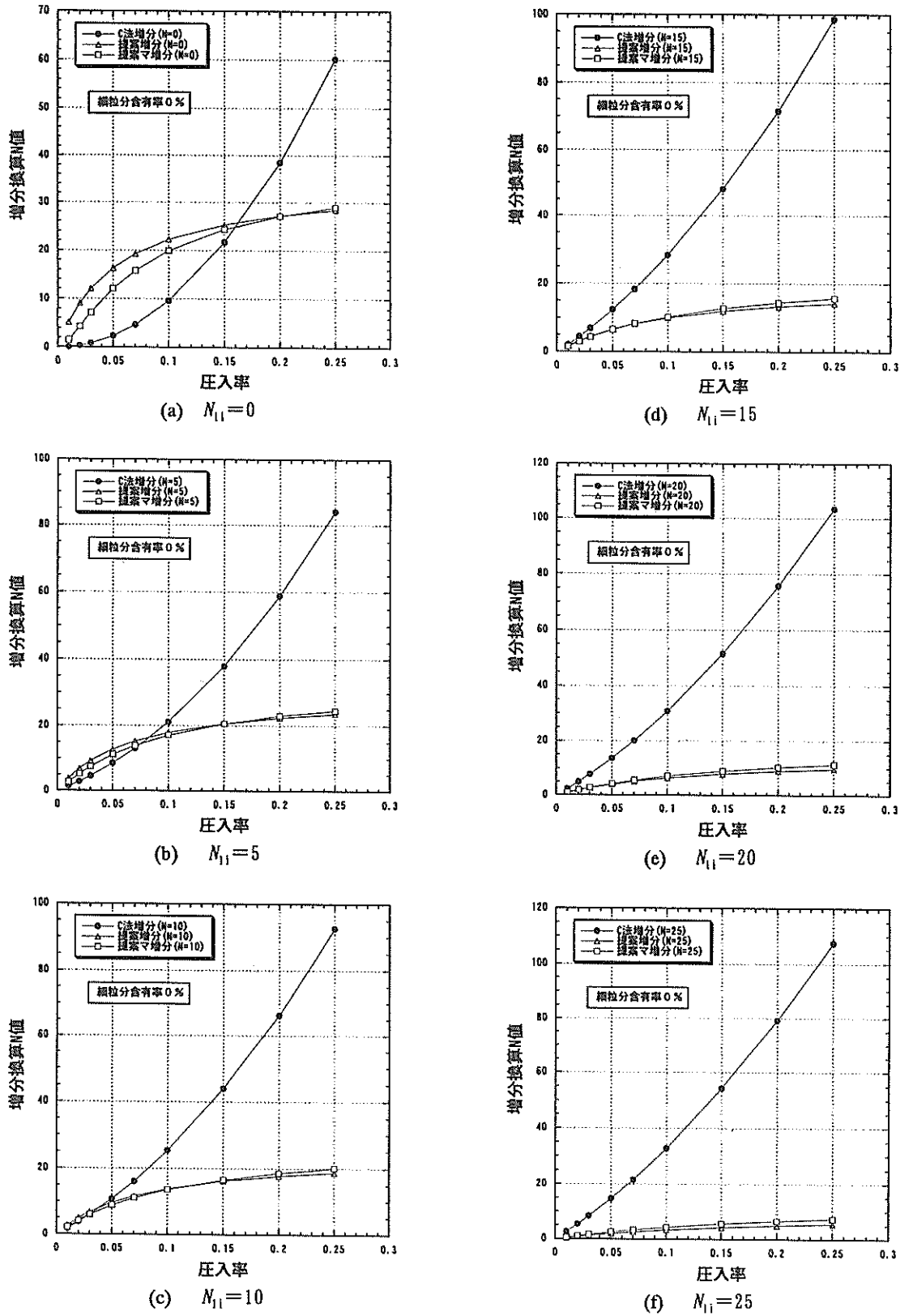


図-19 各原地盤N値における2つの提案手法およびC法による圧入率と増分換算N値の関係

提案手法どうしを比較すると、原地盤換算 $N$ 値が小さい場合( $N_{11}=0, 5, 10, 15$ )には、相対密度と $N$ 値の関係をMeyerhofの式の式(15)としたものは、吉見のデータに基づいた式の式(14)としたものより、圧入率が小さいところで小さめの増分換算 $N$ 値を与えている。このようになる理由も、既に(1)で述べたことと同じく相対密度と $N$ 値の関係式に起因する。以上の提案手法どうしの比較において、原地盤換算 $N$ 値が $N_{11}=10$ より大きい場合や圧入率が $F_v=0.1$ より大きい場合には、両手法による増分換算 $N$ 値に大きな違いはみられなくなる。この比較においても(1)で述べたことと同じく、相対密度と $N$ 値の関係式の違いよりも $N$ 値の上限値がいくつに設定されるかが大きく影響すると考えられる。

## 5.2 砂杭打設による地盤の盛り上がりについて

SCP工法の施工において、砂杭の打設中に周辺地盤に盛り上がり、あるいは逆に沈下が観察される。これは打設された砂杭と等しいだけ杭間の土が体積圧縮していないことによる。このようなことは、SCP工法だけでなく、静的に砂杭を打設する工法や、地盤内にモルタルなどを圧入して締固めを行う工法においても同様である。ここでは、このような締固め工法において生じる、地盤の盛り上がり、あるいは沈下について考察する。

既に述べたように、C法で用いられている締固めメカニズムでは打設された砂杭と等しい体積だけ杭間の土が体積圧縮すると仮定されている。したがって、前節5.1の図-18, 19で示されたC法の●プロットは、各原地盤換算 $N$ 値に対して砂杭が各圧入率で打設された場合の増分換算 $N$ 値を示しているのであるが、地盤が盛り上がりも沈下もしない増分換算 $N$ 値-原地盤換算 $N$ 値-圧入率関係の境界と見なすことができる。例えば、細粒分含有率がゼロの現場で砂杭打設後の換算 $N$ 値の増分が、図18(a)において●より上部にプロットされる場合には、杭間ではより多くの $N$ 値の増分、すなわち、より多くの相対密度の増加があったことになる。したがって、杭間の地盤は沈下したことになる。逆に、●より下部にプロットされる場合には盛り上がったことになる。ただし、これは、相対密度と $N$ 値の関係がC法で用いられているMeyerhofの関係(式(15))の場合である。もし、この関係が正しくなければ、現実の地盤で起こっていることには当然対応しない。しかし、ここでは、相対密度と $N$ 値の関係はMeyerhofの式の関係にあり、●プロットが地盤の盛り上がりや沈下も生じない増分換算 $N$ 値-圧入率-原地盤換算 $N$ 値の関係であるとして考察を進めることにする。

図-18, 19においてMeyerhofの関係式を用いている提案

手法は□プロットのものである。これと●プロットを比較する。

図-18は圧入率をパラメータに原地盤換算 $N$ 値と増分換算 $N$ 値の関係を示したものである。圧入率が $F_v=0.01$ の図-18(a)の場合には原地盤換算 $N$ 値が $N_{11}=12$ までは□は●より上にあり杭間地盤は沈下し、 $N_{11}=12$ 以上では逆に盛り上がることになる。同様に $F_v=0.03$ (図-18(b))では $N_{11}=10$ 、 $F_v=0.07$ (図-18(c))では $N_{11}=6$ 、 $F_v=0.10$ (図-18(d))では $N_{11}=3$ 、 $F_v=0.15$ (図-18(e))では $N_{11}=1$ でそれぞれ杭間地盤の沈下と盛り上がりが入れ替わり、 $F_v=0.20$ (図-18(f))では原地盤換算 $N$ 値によらず杭間地盤は盛り上がることになる。したがって、圧入率が同じであれば原地盤換算 $N$ 値が大きいほど杭間地盤で盛り上がりは大きくなる。また、圧入率が大きくなるほど沈下から盛り上がりになる原地盤換算 $N$ 値は小さくなるのがわかる。

図-19は原地盤換算 $N$ 値をパラメータに圧入率と増分換算 $N$ 値の関係を示したものである。原地盤換算 $N$ 値が $N_{11}=0$ の(図-19(a))の場合には圧入率が $F_v=0.16$ までは□は●より上にあり杭間地盤は沈下し、 $F_v=0.16$ 以上では逆に盛り上がることになる。同様に $N_{11}=5$ (図-19(b))では $F_v=0.07$ 、 $N_{11}=10$ (図-19(c))では $F_v=0.03$ 、 $N_{11}=15$ (図-19(d))では $F_v=0.01$ でそれぞれ杭間地盤の沈下と盛り上がりが入れ替わり、 $N_{11}=20$ (図-19(e))、 $N_{11}=25$ (図-19(f))では圧入率によらず杭間地盤は盛り上がることになる。したがって、原地盤換算 $N$ 値が同じであれば圧入率が大きいほど杭間地盤で盛り上がりは大きくなる。また、原地盤換算 $N$ 値が大きくなるほど沈下から盛り上がりになる圧入率は小さくなるのがわかる。

以上のように、SCP工法で打設される砂杭により生じる杭間地盤(あるいは地盤全体)の沈下、盛り上がり現象を新しく提案された締固めメカニズムに基づき考察した。しかし、ここでの考察は、さらに現場での沈下量、盛り上がり量の実測値により定量的に確認されるべきである。また、杭間 $N$ 値(相対密度)自体が杭芯からの距離で変化しているはずで、このようなことも沈下、盛り上がり量に影響するはずである。したがって、ここでの考察はあくまでも定性的な議論にとどめるべきである。しかしながら、砂杭打設により地盤の沈下、盛り上がり量を議論する必要がある場合には、ここで示された手法は参考にできると考える。

## 5.3 係数 $\kappa$ について

提案法における係数 $\kappa$ はSCP工法の過去の実績を基に算出され、その値は $\kappa=1\sim 15$ と大幅にばらつき、本報告においては $\kappa=5$ が代表値として提案された。ここで、



$\kappa$  のばらつきの持つ意味を考察する。

係数  $\kappa$  は式 (9), (13) の誘導で行われたように  $\kappa_0$  を  $a$  で割ったものである。  $\kappa_0$  は式 (6) で示されたように、圧入率を杭間地盤の累積せん断ひずみに換算する係数である。また、係数  $a$  は杭間地盤の累積せん断ひずみと体積ひずみを関連づける係数である。係数  $\kappa$  のばらつきには、このような関係に含まれる誤差が反映されている。

まず、 $\kappa_0$  に含まれる誤差は、式 (6) で示されるように累積せん断ひずみが圧入率と線型関係にあると仮定されたことと、圧入の仕方により累積せん断ひずみと圧入率の関係に違いがあるはず、という 2 点に起因している。前者については、圧入前の原地盤換算  $N$  値が同じで圧入率が同じであれば  $\kappa$  にばらつきは生じないはずであるので、 $\kappa$  の誤差の原因にはなるがばらつきの原因にはならないといえる。後者については、施工方法による違いがあるといえ、すなわち、SCP 工法とはいっても、締固め方式において、打戻し締固め方式、先端拡張締固め方式、先端振動締固め方式などがあり、さらに、開発されている各工法ごとに細かな違いがある。このような違いがあることから、圧入率が同じでも杭間に与えられた累積せん断ひずみは異なっている可能性がある。  $\kappa$  の算出においては、各工法をすべてまとめて整理しており、これらがばらつきに反映された可能性がある。

次に、係数  $a$  は杭間の体積ひずみと累積せん断ひずみを関係づけるものであるが、体積ひずみは必ずしもせん断による累積せん断ひずみだけにより発生するのではなく、圧密による有効応力の増加によっても発生する。提案手法では、SCP 工法では圧密的な成分よりも累積せん断による成分の方が支配的であるとして、地盤内の有効応力の変化は無視された。このように有効応力の変化を無視したことが係数  $a$  に含まれ、 $\kappa$  のばらつきの原因になっている。さらに、圧入が排水条件でなされたか否かである。図-20 は繰返し三軸試験装置を用いて、排水条件と非排水条件で、供試体に変位制御による繰返し载荷を与えた場合の体積ひずみと繰返し回数との関係である。図-20 の横軸は繰返し载荷回数であるが、変位制御であるので、累積せん断ひずみと同じ意味である。図-20 から、非排水条件によるものの方が体積ひずみは小さくなっていることがわかる。したがって、現場での施工が排水条件に近かったか、非排水条件に近かったかで、杭間地盤の体積圧縮に違いが生じることになり、同じ累積せん断ひずみ（圧入率）でも非排水条件下の方が体積圧縮は小さくなることになる。現場における排水条件、非排水条件は、改良対象となる地盤の細粒分含有率、および対象土層の周囲の土層の排水性などに大きく影響されると考えられ

る。しかしながら、 $\kappa$  の算定においては、このようなことは無視されており、これが  $\kappa$  のばらつきの原因になったとも考えられる。

以上のように、 $\kappa$  には提案締固めメカニズムのモデル化での単純化による誤差とともに、各 SCP 工法の施工上の違いの影響、対象地盤の排水性の影響などが誤差として含まれ、 $\kappa=1\sim 15$  というばらつきの原因になったと考えられる。別の言い方をすれば、提案手法のモデル化における現地との違いの影響をすべて  $\kappa$  に負わせたといえる。なお、本質的ではないが注意されるべき点は、 $\kappa$  の算定にあたって、用いた圧入率はいわゆる公称値である。必ずしも、砂杭が公称値と同じように地盤内で拡張されているとは限らず、このようなことも  $\kappa$  のばらつきに影響しているといえる。

また、以上の  $\kappa$  に関する考察から、ここでの提案手法を SCP 工法以外の締固め工法に適用する場合には、 $\kappa$  にその施工法等の違いを反映させれば良いと思われる。

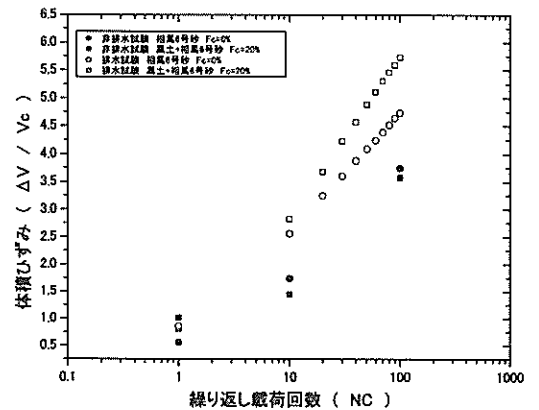


図-20 変位制御による繰返し载荷を与えた場合の体積ひずみと繰返し回数の関係

## 6. 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パイル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。提案手法は $N$ 値と相対密度を関連づける2種類の関係式について提案された。
- 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。
- ⑥SCP工法の現場において観察される、杭間地盤の沈下、盛り上がりについて、その評価手法が示された。
- ⑦圧入率、あるいは原地盤 $N$ 値が大きくなるほど杭間地盤の盛り上がりが生じやすいことが示された。
- ⑧ここで示された提案手法をSCP工法以外の締固め工法に適用する際の考え方が示された。

## 7. あとがき

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、地盤内に砂杭、モルタルなどを静的に圧入させ締固めをねらう工法に対しても適用できると考えられる。

(2002年2月14日受付)

## 謝辞

本報告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。また、動土質研究室の研修生である新坂孝志氏（三信建設工業株式会社）、木村大介氏（国土総合建設株式会社）には本報告の取りまとめにおいてご協力をいただき感謝します。

## 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プロ・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) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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.

付録

①原地盤換算 $N$ 値から原地盤の相対密度の算定

$$D_{r0} = 0.16N_0^{0.5} \quad (A1)$$

ここに、 $D_{r0}$ は原地盤の相対密度、 $N_0$ は原地盤換算 $N$ 値である。

②最大間隙比と最小間隙比の推定

$$e_{max} = 0.02F_c + 1.0 \quad (A2)$$

$$e_{min} = 0.008F_c + 0.6 \quad (A3)$$

ここに、 $e_{max}$ は最大間隙比、 $e_{min}$ は最小間隙比、 $F_c$ (%)は細粒分含有率である。

③原地盤の間隙比の算定

$$e_0 = e_{max} - (e_{max} - e_{min}) D_{r0} \quad (A4)$$

ここに、 $e_0$ は原地盤間隙比である。

④圧入による間隙比の変化量の算定

$$\Delta e = F_v(1 + e_0) \quad (A5)$$

ここに、 $\Delta e$ は圧入により減少する間隙比の大きさ、 $F_v$ は砂杭の圧入率で、図-A.1で示されるように、造成される砂杭の断面積と砂杭の打設間隔で算定される。

⑤圧入による相対密度の増分の算定

$$\Delta D_r = \Delta e / (e_{max} - e_{min}) \quad (A6)$$

ここに、 $\Delta D_r$ は圧入による相対密度の増分である。

⑥圧入後の相対密度の算定

$$D_{r1} = D_{r0} + \Delta D_r \quad (A7)$$

ここに、 $D_{r1}$ は圧入後の相対密度である。

⑦圧入後の換算 $N$ 値の算定

$$N_1 = (1/0.16)^2 D_{r1}^2 \quad (A8)$$

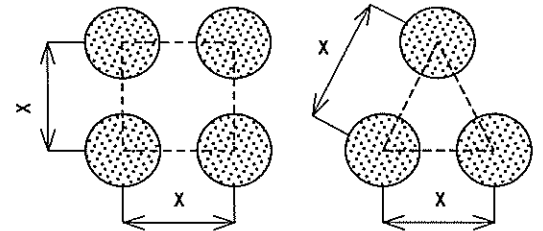
ここに、 $N_1$ は圧入後の換算 $N$ 値(細粒分補正前)である。

⑧圧入による増分換算 $N$ 値の算定

$$\Delta N_1 = \beta (N_1 - N_0) \quad (A9)$$

$$\beta = 1.05 - 0.51 \log_{10} F_c \quad (A10)$$

ここに、 $\beta$ は細粒分に関する $N$ 値の補正係数である。なお、本文中では $F_c < 1.25\%$ に対しては $\beta$ は1.0とした。これは、 $F_c = 1.25\%$ 以下になった場合に、1.0より大幅に大きな値を与え、現実的でないからである。



(a)正方形配置

(b)正三角形配置

図-A.1 砂杭の配置