

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

山崎浩之¹・森川嘉之²・小池二三勝³

¹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)

²正会員 工博 港湾空港技術研究所 地盤・構造部 (同上)

³ 港湾空港技術研究所 地盤・構造部 (同上)

締固め砂杭工法（サンドコンパクションパイル工法）は、密度増加による代表的な液状化対策工法である。同工法の設計、すなわち圧入率あるいは置換率（以下圧入率とする）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 値を用いて行われることが多い。著者らは圧入後 N 値の予測法を既に提案しているが、本ノートでは提案法に砂杭圧入による静止土圧係数 K_0 値の増加の影響を取り込むことを試みた。そして、圧入後 N 値の実測値と予測値を比較し、また、圧入前後の N 値の関係について既往の A 法との比較を行っている。その結果、 K_0 値の影響を取り込むことにより予測法の精度は向上した。また、A 法との比較では細粒分および有効鉛直圧の影響を考慮することにより整合性のある結果を得た。

Key Words: sand compaction pile method, SPT N-value, liquefaction countermeasure, K_0 -value

1. はじめに

締固め砂杭工法（サンドコンパクションパイル工法、以下 SCP 工法）は、液状化対策工法において密度増加を改良原理とする代表的な工法で、最も多く採用されている。著者らは同工法について対策後の杭間 N 値増加の予測法をせん断による土のダイレイタンシー挙動に着目して提案した^{1)~3)}。提案した手法は実測 N 値増加の大きなところで小さめの N 値増加を予測する傾向にあった。図-1 は港湾・空港建設で行われた SCP 工法での砂杭圧入後の杭間 N 値と提案法³⁾による予測値を比較したもので、大きなばらつきはあるが実測 N 値の大きなところで予測値は小さめの値になっており、また予測 N 値は 30 以上にはなりにくい傾向にある。この原因の一つは提案手法の誘導過程で用いている N 値と相対密度の関係式にあると推察される。すなわち、マイヤホッフの式⁴⁾を用いたのであるが、同式には地盤の静止土圧係数 K_0 値の影響が考慮されていない。しかし、締固め砂杭工法では砂杭打設後、 K_0 値が増加することが報告されている^{5)~10)}。また、既往の N 値と相対密度の関係に関する研究では K_0 値が N 値と相対密度の関係に影響を及ぼすことが示されている^{11), 12)}。そこで、本ノートでは N 値と相対密度関係によばず K_0 値の影響に関する既往の研究成果と砂杭圧

入による K_0 値の変化に関する既往の研究成果を利用して、既に提案した予測法に相対密度と N 値の関係に及ぼす K_0 値の影響を取り入れる。そして、予測手法の精度向上について考察し、また、既往の予測手法で比較的細粒分の少ない砂地盤に対して適用実績の豊富な A 法と比較し修正された予測手法の妥当性について考察する。

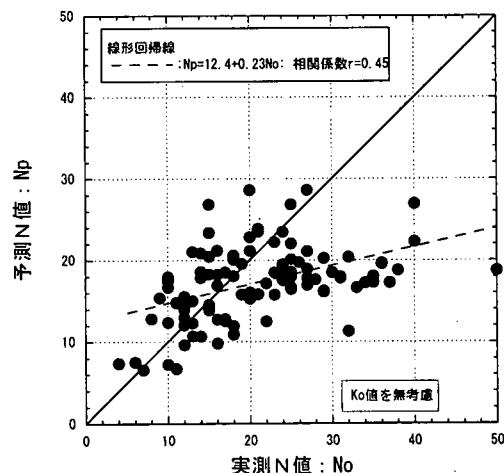


図-1 既提案法による予測 N 値と実測 N 値の対応

2. 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マイヤホップの式⁹⁾は下式のとおりである。

$$D_r = 0.16 \sqrt{\frac{167N}{69 + \sigma_v'}} \quad (1)$$

ここに、 D_r は相対密度、 N は計測された N 値、 $\sigma_v'(\text{kN}/\text{m}^2)$ は N 値が計測された位置での鉛直有効応力である。

式(1)は鉛直有効応力が一定であれば 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¹⁰⁾。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 値が変化する場合には、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。

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

ここに、 σ_m' は平均有効主応力(kN/m^2)、 K_0 は静止土圧係数である。

なお、安田らの報告¹²⁾では相対密度が大きいところ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

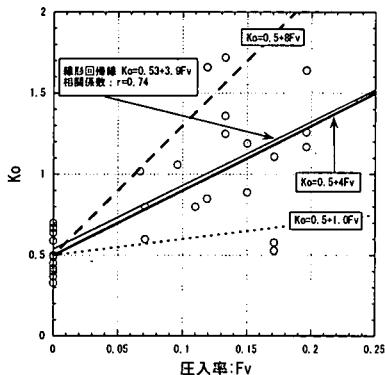


図-2 K_0 値と圧入率の関係^{5)~10)}

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。

(2) 圧入率と K_0 値の関係

図-2 は SCP 工法施工での K_0 値と圧入率の関係に関する報告^{5)~10)}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-2 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-2 の細実線はプロットの関係の線形回帰線である。図-2 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マイヤホップの式の修正を行う。

マイヤホップの式で相対密度を 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。

$$D_r = 0.16 \sqrt{\frac{aN}{b + (1+2K_0)\sigma_v'/3}} \quad (3)$$

ここに、 a と b は定数である。

ここで、 a と b は式(1)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(3)は $K_0=0.5$ では式(1)と同じ D_r を与えなければならないので、 $a=167 \cdot (1+2 \cdot K_0)/3 \approx 111(\text{kN}/\text{m}^2)$ 、 $b=69 \cdot (1+2 \cdot K_0)/3=46(\text{kN}/\text{m}^2)$ となる。以降では $a=111(\text{kN}/\text{m}^2)$ 、 $b=46(\text{kN}/\text{m}^2)$ 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-2 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-2 の各プロットを式(4)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(4)は単純な近似であるが、これは本ノートでは 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。

$$K_0 = 0.5 + \alpha F_v \quad (4)$$

ここに、 F_v は砂杭の圧入率、 α は線形近似の勾配で、図-2 の実線で示す平均的なラインでは $\alpha=4$ 、圧入率に対しても大きな 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(3)と式(4)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。

$$D_r = 0.16 \sqrt{\frac{a}{b + 2(1+\alpha F_v) \sigma_v' / 3}} N \quad (5)$$

ここに、 $a=111(\text{kN}/\text{m}^2)$ 、 $b=46(\text{kN}/\text{m}^2)$ 、 $\alpha=1\sim 8$ で、 $\alpha=0$ とした場合には式(5)は式(1)に一致する。

3. 圧入による K_0 値の変化を考慮した予測式

著者らが既に提案した杭間 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(1)を用いていた³⁾。ここでは式(1)を砂杭圧入による K_0 値変化の影響を考慮した式(5)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) 相対密度と圧入率の関係

著者らは福武のおわんモデル¹³⁾を利用して、杭間地盤の相対密度と圧入率の関係式を、次式のように誘導した。

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

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

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

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

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

ここに、 F_c は細粒分含有率(%)、 e_{\max} は最大間隙比、 e_{\min} は最小間隙比、 F_c は圧入率である。 γ_i^* は累積せん断ひずみの初期値、 κ は係数でそれぞれの物理的意味は参考文献1)を参照されたい。

(2) 杭間 N 値の予測式

既に提案した杭間 N 値の予測式の誘導過程³⁾と同じ要領で砂杭圧入による N 値の予測式が式(5)と式(6)から下式のように誘導される。

$$N_1 = C_M \left(\frac{\kappa F_v + \gamma_i^*}{c_1/c_2 + \kappa F_v + \gamma_i^*} \right)^2 \frac{46 + (2/3)(1+\alpha F_v)\sigma_v'}{111} \quad (11)$$

$$\gamma_i^* = \frac{(111/(46+(2/3)\sigma_v'))(N_0/C_M))^{0.5}}{(c_2/c_1)(1 - ((111/(46+(2/3)\sigma_v'))(N/C_M))^{0.5})} \quad (12)$$

ここに、 N_1 は砂杭圧入後の N 値、 N_0 は圧入前の原地盤 N 値で（それぞれ鉛直有効応力により補正されない計測 N 値）、 $C_M=(1/0.16)^2$ である。

ここで、パラメータ κ は過去の SCP 工法の実績から算出され、式(11)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。

$$\kappa = \frac{(c_2/c_1)\gamma_i * \left(1 - \sqrt{N_1/(C_M A)} \right) - \sqrt{N_1/(C_M A)}}{(c_2/c_1)F_v \left(\sqrt{N_1/(C_M A)} - 1 \right)} \quad (13)$$

$$A = \frac{46 + (2/3)(1+\alpha F_v)\sigma_v'}{111} \quad (14)$$

パラメータ κ は式(13)、(14)と SCP 工法の N_1 、 N_0 、圧入率の実績から得られるが、 κ には細粒分含有率の影響が反映される³⁾。そこで、得られたパラメータ κ と細粒分含有率の関係からパラメータ κ を細粒分含有率の関数として同定する。

図-3 のプロットは図-1 と同じデータを用い、 $\alpha=4$ として式(12)～式(14)から κ を算出したものである。ただし、圧入後の N 値が圧入前より小さいものなどは除去している³⁾。図-3 のプロットはばらつきが大きいが κ と細粒分含有率の関係を指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 κ と細粒分含有率の関係を次式にまるめて近似することとする（図-3 中の実線）。

$$\kappa = 4 \cdot 10^{-0.01 F_c} \quad : \alpha = 4 \quad (15)$$

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(7)～(12)および式(15)により砂杭圧入後の杭間 N 値を予測することができる。

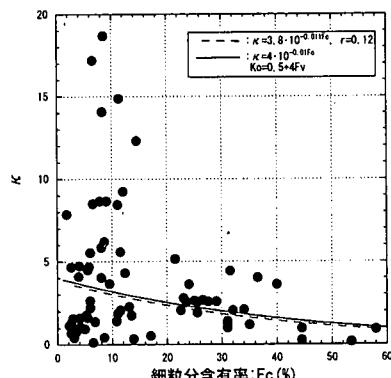


図-3 パラメータ κ と細粒分含有率の関係

4. 予測式についての考察

ここでは、3章で提案した杭間N値の予測式について考察を行う。考察は実測値と予測値の比較と、ここで用いたデータ以外との比較という意味からA法¹⁴⁾との比較を行い、修正された予測式の妥当性を検討する。A法と比較を行うのは、A法のチャートはB法、C法と呼ばれるものと比較して生データをそのまま整理した形になつておらず、実測との比較になりやすいと考えたからである。

(1) 実測N値と予測N値の関係

図-4(a)は図-1と同じデータを用いて、圧入後の杭間実測N値と本ノートで提案した予測式(式(7)～(12),(15))による予測N値を比較したものである。また、図-4(b)、(c)はパラメータの感度分析をしたもので、図-4(b)は $\alpha=8$ 、図-4(c)は $\alpha=1$ とした場合のもので、これらの場合には式(15)の κ と F_c の関係は異なり $\alpha=8$ の場合には $\kappa=2 \cdot 10^{-0.005F_c}$ 、 $\alpha=1$ の場合には $\kappa=7 \cdot 10^{-0.01F_c}$ である。

図-4(a)と図-1を比較すると図中の r で示す相関係数は図-4(a)の方が高く、また実測N値の大きなところでは予測N値が小さめになるというプロットの偏りも解消されている。しかし、実測N値の小さいところでは図-1よりも図-4(a)の方が実測N値に対して予測N値は大きめになっている。したがって、圧入による K_0 値の変化を導入したことにより予測精度は改善されたが精度が低下した面もあり大幅な改善ではないといえる。また、図-4(a)～(c)を比較すると、 K_0 値と圧入率関係の平均の関係である $\alpha=4$ を用いても、 $\alpha=8$ あるいは $\alpha=1$ を用いても、図-4において相関係数に大きな違いは見られない。

上記のように、予測式に K_0 値の影響を導入しても大幅な精度向上にならなかつた理由や、係数 α に対して比較的鈍感な結果になった理由は以下のことが推察される。すなわち、 K_0 値と圧入率を関係づける式(4)の根拠である図-2においてプロットに大きなばらつきがあり、これらの誤差が予測式に含まれている。また、安田らの研究¹²⁾では相対密度とN値の関係に及ぼす K_0 値の影響の大きさは相対密度自体に依存するようである。これは相対密度とN値の関係が平均有効主応力により一意的に定まるとした式(3)は厳密には成立せず誤差が含まれることを意味している。さらには圧入前後のN値に大きく影響する要因が K_0 値以外にあることも考えられる。

(2) 圧入前後のN値の関係

既往の杭間N値の予測法として、A法¹⁴⁾とよばれる方法がある。A法は過去のSCP工法の実績を集積した経験的な方法で、細粒分含有率が0～20%の地盤に対して圧入前後のN値の関係を示すチャートを与えている。本項では、式(7)～(12)、(15)で示した圧入後杭間N値の予測

式の妥当性を確認するために、A法で示されたチャートとの比較を行う。ここで、A法のチャートは細粒分含有率が20%以下のデータが混在したもので、また地盤の鉛直有効応力は明示されていない。そこで、細粒分含有率が $F_c=10\%$ 、鉛直有効応力が $\sigma_v=98kN/m^2$ と仮定して予測式で計算し比較する。なお、ここでの比較は、本ノートでの提案式と、図-1の予測値を算出した K_0 値の考慮のない従前の予測式³⁾の両方について行う。

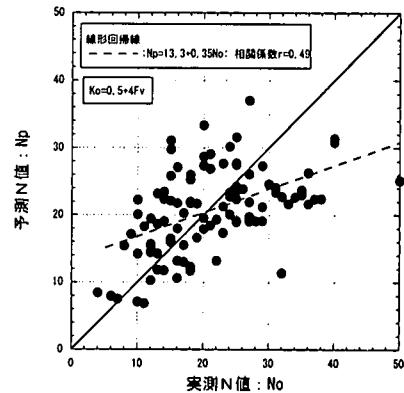


図-4(a) 予測N値と実測N値の比較($K_0=0.5+4F_v$)

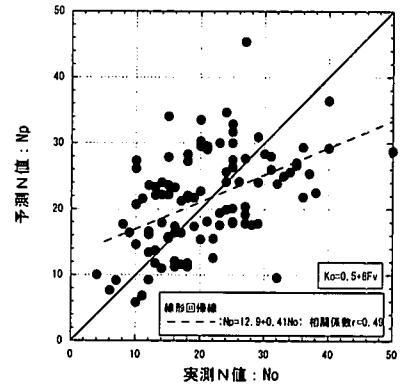


図-4(b) 予測N値と実測N値の比較($K_0=0.5+8F_v$)

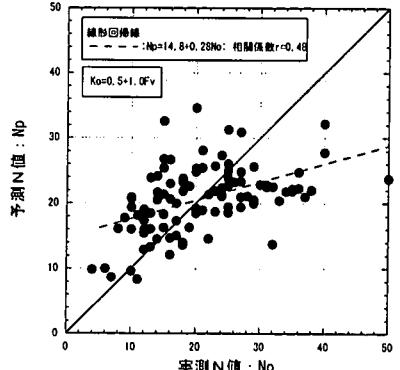


図-4(c) 予測N値と実測N値の関係($K_0=0.5+1.0F_v$)

図-5 の太実線が提案法によるもの、点線が A 法によるもので、それぞれ圧入率と圧入前後の N 値の関係であり、図-5(a) の太実線は従前の予測式、図-5(b) の太実線は本ノートでの提案式である。図-5(a) と (b) の比較から、従前の予測式では圧入前 N 値が 15 で圧入率が 0.2 の場合に圧入後 N 値は 25 であるが、本ノートの提案式では圧入後 N 値は 35 と大きくなっている。また、A 法と比較すると、図-5(a) の従前のものより図-5(b) の本ノートの提案式の方が A 法の傾向に近い。A 法のオリジナルの図では圧入前 N 値が 10 以上で圧入後に N 値が 30 を超える実測プロットがあり、整合するようになっている。

また、図-5(b) から、圧入前 N 値が小さいところでは提案法の方が A 法よりも大きめの圧入後 N 値を算出する傾向にある。このような傾向になる理由は(1)で述べた提案法自体の精度の問題以外に、A 法に関して以下のことが推察される。一般的に原地盤 N 値は鉛直有効応力が小さくなると小さくなり、細粒分含有率が大きくなると小さくなる。A 法の点線の根拠となったデータは細粒分含有率が 0~20% で、鉛直有効応力はある範囲にあると思われ、これらのデータが混在した平均値である。したがって、A 法の点線は、原地盤 N 値の小さなところは細粒分が多く鉛直有効応力が小さなデータが反映され、原地盤 N 値の大きなところはその逆の傾向があると思われる。以上のようなことが図-5 での比較に現れていると考えられる。図-6 はこのようなことを考慮し、A 法へのフィッティングを試みたものである。フィッティングでは試行錯誤したが、細粒分含有率は原地盤 N 値に逆比例するとして $F_c(\%) = 15 - N/2$ 、鉛直有効応力は原地盤 N 値に比例するとし $\sigma_v(kN/m^2) = 50 + 50/20N$ することにより A 法に近い結果が得られた。細粒分含有率と鉛直有効応力の影響も考慮すると、A 法との整合性がとれるといえる。

以上、(1)と(2)から K_0 値の影響を導入したことにより、圧入後 N 値の予測式は精度が向上したといえる。

5. 結論

SCP 工法での砂杭圧入後の N 値の予測式について圧入による K_0 値増加の影響を検討し、以下の結果を得た。
①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 値の関係式を誘導し、これと著者らが提案している相対密度と圧入率の関係式を組み合わせることにより、砂杭圧入による K_0 値増加の影響を考慮した圧入後 N 値の予測式を提案した。

②提案した予測式は従前の著者らの提案式で問題のあった大きな圧入後 N 値を予測できない点を改善しており、また実測値との相関も良くなった。

③ K_0 値と圧入率の関係が提案式の予測結果におよぼす影響について感度分析を行ったところ、 K_0 値と圧入率の関係が変化しても大きな影響はなかった。

④従来からの圧入後 N 値の予測法の一つである A 法とよばれる方法との整合性も K_0 値の影響を考慮することにより良くなった。

⑤N 値と相対密度関係に及ぼす K_0 値の影響、 K_0 値と圧入率の関係についてさらに精度向上させる必要がある。

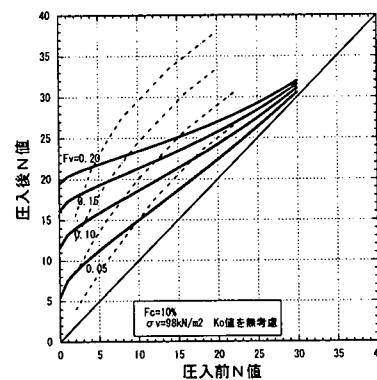


図-5(a) 圧入前後の N 値: $F_c=10\%$ (K_0 値を無考慮)

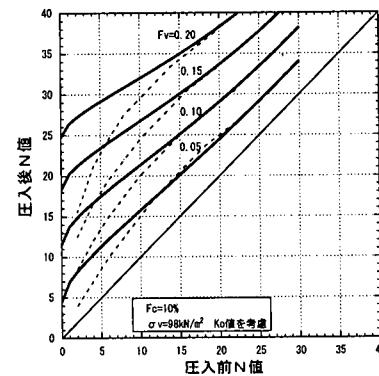


図-5(b) 圧入前後の N 値: $F_c=10\%$ (K_0 値を考慮)

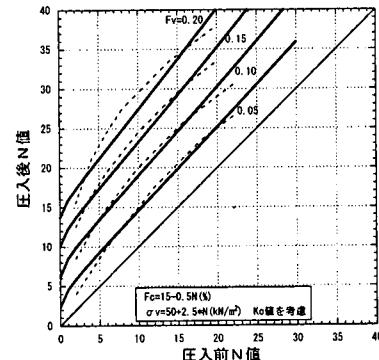


図-6 圧入前後の N 値: F_c と σ_v を変化

6. おわりに

SCP 工法での砂杭圧入後の原地盤 N 値の予測式を、著者らはせん断による負のダイレイタンシーに着目して提案している。本ノートで K_0 値を導入し予測式を改良したが、依然として大きなばらつきを持った予測である。これは、 K_0 値は圧入率だけでなく地盤状況の違いなど多くの要因に影響され変化し、これが反映されていると考える。したがって、改良した予測式の適用に際しては危険側の予測を行う場合があると思われ、この点に注意が必要といえる。また、SCP 工法での N 値の予測は、そのまま設計で必要とされる N 値、例えば液状化しないための N 値と結びつくものである。本ノートで示したように、圧入後の N 値には K_0 値の影響が含まれており、設計は K_0 値の影響を受けた N 値で行っていることになる。通常、 K_0 値の影響は考慮せずそのまま N 値を用いており、これが実際にどの程度施設の安全性等に影響があるか、その把握は個々の設計法の課題であり本ノートで論じた圧入後 N 値の予測の課題ではないが、今後検討を進める必要があるといえる。また、圧入後 N 値の予測精度向上のためには、SCP 工法の締固めメカニズムをさらに研究することはもちろんあるが、標準貫入試験以外のサウンディング手法や他の土質パラメータの導入も必要と考える。

謝辞：本ノート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) 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.
- 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 卷, 第 2 号, pp. 93-118, 2002.
- 3) 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.
 - 4) Meyerhof, G G: Discussion of Session 1, *Proc. of 4th ICSMFE*, London, Vol. 3, p. 110, 1957.
 - 5) 石田定一, 高橋五郎 : 埋立地盤における液状化防止対策工法について, 第 31 回建設省技術研究報告, pp. 1-7, 1977.
 - 6) 斎藤和夫, 出垣広明, 妹尾英世 : サンドコンパクションパイルによる液状化対策工の効果, 第 36 回土木学会年次学術講演会講演集第 III 部門, pp. 720-721, 1981.
 - 7) 草野郁 : サンドコンパクションパイル工法の実際と問題点 (3) 堤防基礎地盤の改良効果と堤防の耐震性, 土と基礎, Vol. 31, No. 4, pp. 79-86, 1983.
 - 8) 烏取孝雄 : 京葉線高架橋の液状化対策, 基礎工, pp. 69-73, 1984.
 - 9) 木村保, 塩田啓介, 三沢久時, 川鍋修 : コンパクションパイル打設地盤の K_0 値について (その 2), 第 22 回土質工学研究発表会講演集, pp. 1795-1796, 1987.
 - 10) 末松直幹, 竹原有二 : 基礎のための地盤改良工法, 橋梁と基礎, 77-12, pp. 21-25, 1977.
 - 11) 古賀泰之, 古閑潤一, 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.
 - 12) 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.
 - 13) 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.
 - 14) 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.

(2003. 2. 19 受付)

STUDY ON EFFECT OF K_0 -VALUE ON SPT N-VALUE PREDICTION AFTER DENSIFICATION BY SAND COMPACTION PILE METHOD

Hiroyuki YAMAZAKI, Yoshiyuki MORIKAWA and Fumikatsu KOIKE

The authors have proposed a method to predict the SPT N-value between piles by the sand compaction pile method. It is, however, found that the method tends not to predict large SPT N-values because the effect of the increase in K_0 -values due to the compaction is not considered. In this study the effect of the K_0 -value on the SPT N-value is taken into consideration to modify the prediction method. The modified method is examined with observed SPT N-values and a conventional prediction method called A-method. It is found that the modified method has higher accuracy than the original.