

# 深層混合処理工法における地盤評価と その自動化施工への応用

建山和由<sup>1</sup>・深川良一<sup>2</sup>・辻井 剛<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 京都大学講師 工学部土木工学科 (〒606-01 京都市左京区吉田本町)

<sup>2</sup>正会員 工博 愛媛大学助教授 工学部土木海洋工学科 (〒790 松山市文京町3)

<sup>3</sup>(株)神戸製鋼所 建設汎用機械本部 土木機械室 設計担当課長 (〒674 神戸市大久保町八木740)

深層地盤改良工法の一つである粉体噴射攪拌工法(DJM工法)の自動化に関する研究の一環として、施工中の機械負荷から地盤特性を評価する手法について、理論的考察、ならびに現場実験による検討を行った。理論的検討では、地盤を回転掘削する際に攪拌翼に作用する掘削抵抗の発生機構を考察し、この結果をもとに攪拌翼に作用するトルクから地盤のN値を推定する手法の開発を試みた。また現場実験では、実施工において改良機に作用する攪拌トルクを計測し、これと地盤のN値との関係を検討した。これらの結果をもとに、施工中に地盤のN値をリアルタイムで評価する手法の可能性と地盤評価にもとづく自動化施工について考察を行った。

**Key Words :** soil improvement, deep mixing method, ground evaluation, automatic control, construction machinery

## 1. はじめに

建設機械の自動化、操作の簡略化は、機械化施工に関する研究者にとって最大の関心事である。この分野の研究開発は、電気、機械、情報などの各種要素技術の高度化とともに近年めざましい発展をとげているが、建設ロボットが施工現場で有効に使用されるようになるまでには解決しなければならない多くの問題をかかえている。地盤評価とそれに基づく最適作業条件の決定もその1つである。

建設機械の中でも特に土や岩などの地盤材料をその作業対象とする機械は、地盤特性を評価しそれに適した操作を行う機能を備えることが要求される。従来この操作はオペレータが経験から得た知識に基づいて行ってきたが、これらの機械を自動化するには、地盤の評価とそれに基づく最適な操作方法の決定を機械自らが行う手法を開発しなければならない。

著者らは、建設機械の自動化を目指し、種々の建設機械を用いた施工における地盤評価とその自動化施工への応用について研究を行ってきた。本論文ではこれらの研究のうち、深層地盤改良工法の一つであるDJM工法において施工中に施工機械に作用する負荷から地盤特性を評価する手法の開発とその自動化施工への応用に関する研究について報告を行う。

## 2. DJM工法の概要

DJM工法は、Dry Jet Mixing工法(粉体噴射攪拌工法)の略称で、深層地盤改良工法の一つである。この工法では先端に攪拌翼が取り付けられた攪拌軸を回転させながら軟弱地盤中に貫入して行き、土中にセメントや石灰などの粉粒体の改良材を供給する。Fig.1に標準攪拌翼を、Fig.2にこの工法における施工の流れを示す。改良材は空気流により地上から攪拌軸内を搬送され、攪拌翼付け根部から翼の回転によって地中に生じる空隙部に吐出される。吐出された改良材は攪拌翼の回転に伴って回転軌跡全面に均等散布され、さらに原位置土と攪拌混合される。改良材と分離した空気は、攪拌軸に沿って軸と土の間隙から地表に放出される。土と混合された改良材は、ポゾラン反応、水和反応などによって短時間に安定した固結土を形成し、地中に改良柱体が形成されることになる。

## 3. 研究の背景

DJM工法では、支持層が深く改良柱体を支持層まで到達させることができない場合を除き、一般に支持層まで打設する「着底打設方式」が採用される。

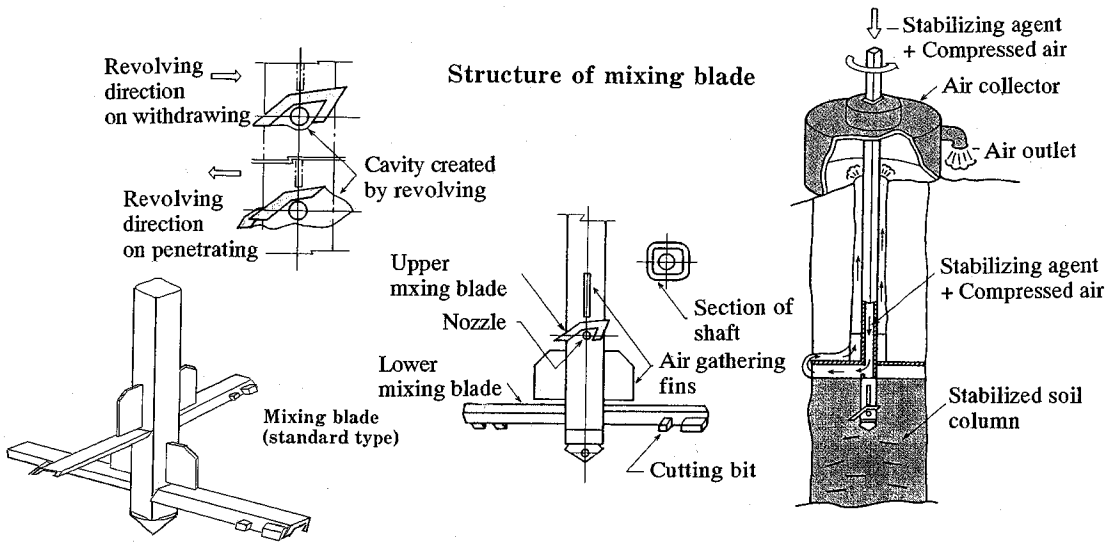


Fig. 1 Structure of mixing blade

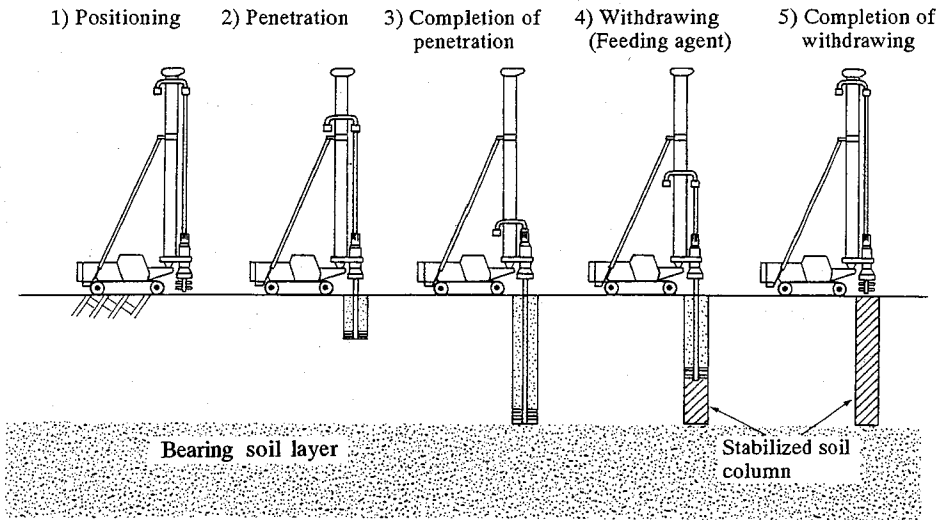


Fig. 2 Construction procedure in DJM method

この場合、支持層に到達した時点で貫入を止め、改良材を吐出しながら引き抜き・攪拌を行い改良柱体を造成していく。通常、支持層到達の判断は、事前に調査したN値などに関する地盤情報と貫入時に攪拌翼に作用するトルクや貫入抵抗などの機械負荷を参考に行われる。この場合、一般に深部の支持層とその上部の地層の境界が明確で、その境界を境にして土の強度が大きく変化する場合には支持層到達の判断は容易である

が、着底対象である支持層付近の土の強度が地中の深さとともに緩やかに変化している場合には、攪拌翼に作用するトルク（以下、攪拌トルクという）や貫入抵抗の変化も緩やかであるため、支持層に達したか否かの判断が難しいのが現状である。このため安全率を見込んで必要以上の深度まで攪拌翼を貫入し、結果として施工能率の低下につながるケースが多い。

また、改良により均一な地盤を造成するには、地盤を構成する土質に応じて吐出する改良材の量を調整することが望ましいが、このためには地中の地盤構成を的確に把握する必要がある。地中の地盤構成については事前ボーリングによりある程度情報が得られるが、複雑に変化する地層条件に的確に対応するには施工中に各改良地点において地中の土質条件を正確に把握する必要がある。

このような施工上の問題を解決するためには、施工中に貫入時の機械負荷等から地中の土の特性を的確に評価する手法を確立する必要がある。これにより支持層到達の着底判断が可能となり、さらに、攪拌翼の貫入時に地中の地盤評価を行うことができれば、引き抜き時に各深度の土質に応じて吐出する改良材の量を調整することができ、均質な改良地盤を造成することが可能となる。

DJM工法における機械負荷と地盤特性との関係については既にいくつかの報告がなされており<sup>1)2)</sup>、著者らもファジー推論を利用して機械負荷から地盤特性を推定する手法の開発を行ったが<sup>3)</sup>、本研究では、機械負荷の発生機構について理論的考察を行い、この結果を用いて機械負荷から地盤特性を推定する手法を検討した。

#### 4. 機械負荷と地盤特性との関係に関する理論的考察

施工中の機械負荷と地盤特性との関係について理論的考察を行う。機械負荷としては、地盤特性の影響を受けやすい攪拌トルクを考える。また、現在の施工では、地盤調査として標準貫入試験を用いる場合が多いため、ここでは地盤特性をこの試験から求められるN値で代表させることにする。ただし、攪拌トルクの発生機構を理論的に考察する際には、N値ではなく、土の内部摩擦角 $\phi$ と粘着力 $c$ を用いざるを得ないため、以下の議論では攪拌トルクと土の $c$ 、 $\phi$ との関係を求め、既存の情報として $c$ 、 $\phi$ とN値との関係に関する経験式を介して、攪拌トルクと地盤のN値との関係を求めた。

##### (1) 攪拌トルクの発生機構

攪拌翼が地中で回転する際に発生する攪拌トルクは、翼に作用する掘削抵抗に起因すると考えられる。そこで以下の攪拌トルクの発生機構に関する理論的考察においては、畠の地盤掘削に関する研究を参考にする<sup>4)</sup>。畠によると、すくい角 $\alpha$ (度)、幅 $B$ (m)の掘削刃を用いて一定の深さ $t_0$ (m)の土を掘削する場合(定常掘削と呼ぶ、Fig.3参照)、掘削刃に作用する掘削抵抗の

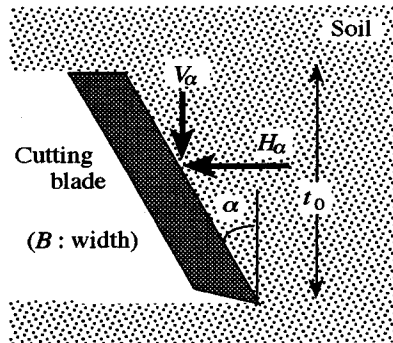


Fig.3 Sketch of a cutting blade

水平成分 $H_\alpha$ (N)は次式で表される。

$$H_\alpha = 1.82 B t_0^2 R_S 10^{-m} \quad (1)$$

ここで、 $R_S$ は、比掘削抵抗と呼ばれる地盤の強度を表すパラメータ( $N/m^3$ )であり、後述のように簡単な原位試験で求めることができる。また、 $m$ は実験定数であり、砂質土で $7.85 \times 10^{-3}$ 、粘性土で $3.84 \times 10^{-3}$ である。

掘削とともに深さが変化していく非定常掘削の場合の掘削抵抗は、式(1)で表される抵抗と刃先が地盤に貫入することにより生じる抵抗との和で与えられる。刃先の貫入にともなう掘削抵抗(くい込み抵抗と呼ぶ)の水平分力 $H_p$ (N)は、畠によると次式で与えられる。

$$H_p = B b t \frac{dt}{dx} \tan \delta \quad (2)$$

ここで、 $b$ は貫入抵抗係数( $N/m^2$ )で比掘削抵抗 $R_S$ と掘削刃のすくい角 $\alpha$ から求めることができる。また、 $t$ は刃先の地中での深さ(m)、 $dt/dx$ は、刃先の描く軌跡の勾配( $x$ :水平移動距離(m))を、また $\delta$ は刃と土との間の摩擦角(度)を表す。

いま、Fig.4(a)に示すような攪拌翼が回転数 $f$ (回転/sec)、鉛直方向の貫入速度 $v$ (m/sec)で地盤中に回転貫入する場合を考える。この場合、攪拌翼は回転しながら地中に貫入していくため、攪拌翼の攪拌トルクとしては、上記の定常掘削抵抗と貫入することにより生じる非定常掘削抵抗を考え、両者に起因するトルクを足し合わせなければならない。掘削抵抗の定常成分と非定常成分に起因するトルクは上記の議論を利用して以下のように表すことができる。

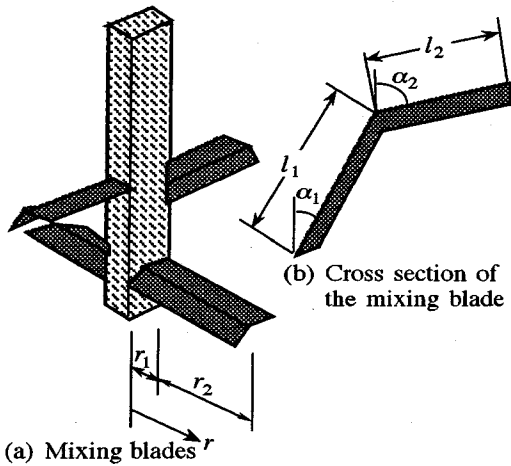


Fig. 4 Sketch of a mixing blade

#### a) 定常掘削成分に起因する攪拌トルク

まず、定常掘削成分に起因する攪拌トルク  $T_c$  (Nm) は式(1)より次式のように表される。

$$T_c = 4 \int_{r_1}^{r_2} 1.82 R_s \left\{ (l_1 \cos \alpha_1)^2 10^{-m\alpha_1} + (l_2 \cos \alpha_2)^2 10^{-m\alpha_2} \right\} r dr$$

$$= 3.64 R_s (r_2^2 - r_1^2) \left\{ (l_1 \cos \alpha_1)^2 10^{-m\alpha_1} + (l_2 \cos \alpha_2)^2 10^{-m\alpha_2} \right\} \quad (3)$$

ここで、 $r$  は、攪拌翼の任意部分の回転中心からの長さ(m)を、 $r_1, r_2$  は攪拌翼の回転中心からの長さのうち掘削に寄与する部分の両端の長さ(m)を (Fig. 4 (a) 参照)、また  $l_1, l_2, \alpha_1, \alpha_2$  は Fig. 4 (b) に示す各部分の長さ(m)とすくい角(度)を表す。また、攪拌トルクとしては、上下2段の攪拌翼についての合計を表している。

#### b) 貫入抵抗成分に起因する攪拌トルク

攪拌翼の回転貫入においては、回転中心より  $r$  (m) の距離にある刃先の部分の貫入軌跡の勾配は  $v/2\pi r f$  で表されるから、くい込み抵抗に起因する攪拌トルク  $T_p$  は次式で表すことができる。

$$T_p = 4 \int_{r_1}^{r_2} b t \frac{v}{2\pi f} \tan \delta dr$$

$$= \frac{2b}{\pi} t \frac{v}{f} \tan \delta (r_2 - r_1) \quad (4)$$

ここでは  $b$  の貫入抵抗係数の値としては、畠の研究結果<sup>9)</sup>を参考に実機の攪拌翼のすくい角が50度であることを考慮して、 $b = 0.2 R_s$  (m) なる関係を採用する

ことにする。また、式(4)中の  $t$  は刃先の地中における深さであるが、ここでは攪拌翼の地中での深さ  $z$  (m) ではなく、攪拌翼に作用する鉛直土圧  $P(z)$  (N/m<sup>2</sup>) を土の単位体積重量  $\gamma$  (N/m) で除した換算深さ  $P(z)/\gamma$  を用いることにする。攪拌翼に作用する鉛直土圧は地中における攪拌翼の運動に関連するため算定することが困難であるが、ここでは以下の考え方で鉛直土圧の算定を行った。

#### c) 攪拌翼に作用する鉛直土圧

地中構造物に作用する鉛直土圧  $P(z)$  は、一般には土のせん断抵抗の作用により土被り圧  $\gamma z$  より小さな値を示す。代表的な例として、地中に埋設された管路に作用する鉛直土圧  $\bar{P}(z)$  は次式で表される<sup>6)</sup>。

$$\bar{P}(z) = \frac{(\gamma B - 2c)}{2K \tan \phi} \left( 1 - e^{-\frac{2zK \tan \phi}{B}} \right) \quad (5)$$

ここで、 $K$  は土圧係数、 $B$  は埋設管の幅 (m) である。また、 $K \tan \phi$  の値は土質特性に依存し、粘着力のない粒状土で 0.165~0.192、粘土で 0.11~0.13 といわれている。地中で静止している攪拌翼にはこれと同様の鉛直土圧が作用するものと考えられる。

また、攪拌翼が地中で回転している場合には、攪拌翼は前述のように土を掘削していく。掘削される土が密な砂の場合には、掘削により砂は体積膨張を生じようとするが、周りは土で拘束されているため、攪拌翼周辺には式(5)で表される圧力よりも大きな圧力が生じることになる。密な砂の膨張にともなう圧力増加を算定することは困難であるが、ここでは、以下の仮定にしたがい、攪拌翼に作用する土圧を内部摩擦角  $\phi$  の関数として求めた。

- $\phi=15$ 度の緩い砂の場合には式(5)で表される土圧が攪拌翼に作用する ( $\phi=15$ 度を内部摩擦角の最小値に選んだのは、内部摩擦角とN値との関係に、後述の式(7)を用いたためである)。
- $\phi=50$ 度を内部摩擦角の最大値とし、このときには式(5)で表される土圧の  $n$  倍の土圧が攪拌翼に作用する (後述の計算では、 $n=1, 2, 3, 4$  の場合について検討を行う)。
- 内部摩擦角  $\phi$  が15度~50度の範囲では土圧の値  $P(z)$  は  $\bar{P}(z) \sim n\bar{P}(z)$  の範囲で内部摩擦角の値と共に指数関数的に増加する。

Fig.5 は以上の仮定を図に示したものである。

以上の議論より、攪拌トルクは、式(3)の  $T_c$  と式(4)の  $T_p$  との和で与えられることになる。

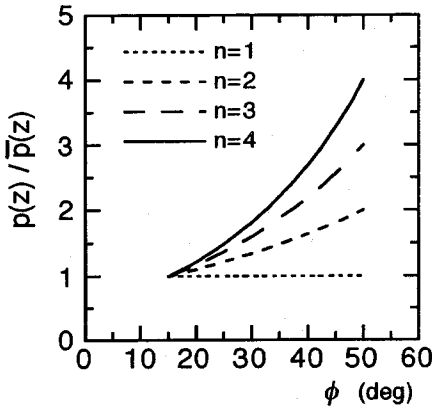


Fig.5 Difference of the relationship between  $p(z)/\bar{p}(z)$  and  $\phi$  by the value of  $n$

(2) N値と  $R_s, c, f$  の関係について

前述の考察では、攪拌トルクに及ぼす地盤からの影響は、比掘削抵抗  $R_s$  で表されている。このため、攪拌トルクとN値との関係を求めるには、 $R_s$  とN値との関係を与える必要がある。 $R_s$  は Fig.6 に示すように細長い鋼板を鉛直に地盤に貫入し、地表面を固定支点として回転させたときの転倒モーメント  $Pl$  から次式を用いて求められる地盤定数である<sup>4)</sup>。

$$R_s = \frac{Pl}{b_{RS} x_{RS}^3}$$

このとき、比掘削抵抗  $R_s$  と土の粘着力  $c$ 、内部摩擦角  $\phi$  とは次式で関係づけることができる<sup>7)</sup>。

$$R_s = \pi \left( \frac{1}{3b_{RS}} + \frac{1}{2x_{RS}} \right) (c + p(z) \tan \phi) \quad (6)$$

ここで、 $b_{RS}$  は  $R_s$  測定用鋼板の幅 (m)、 $x_{RS}$  は同じく鋼板の貫入深さ (m) である。また、 $p(z)$  は前述の地中深さ  $z$  (m) において  $R_s$  測定用鋼板に作用する鉛直土圧 ( $N/m^2$ ) である。

N値と内部摩擦角  $\phi$  (度) との関係については、従来より、「N値が大きい地盤ほど内部摩擦角  $\phi$  も大きい」というのが定説で、両者の関係を表わすための経験式が種々提案されている<sup>8)</sup>。ここでは、それらの諸式のうち土の種類によらず利用しやすい式(7)を用いて議論を進めることにする。

$$\phi = \sqrt{20N} + 15 \quad (7)$$

N値と粘着力との関係についてはN値と非排水せん断強度  $c_u$  との関係として与えられることが多い。

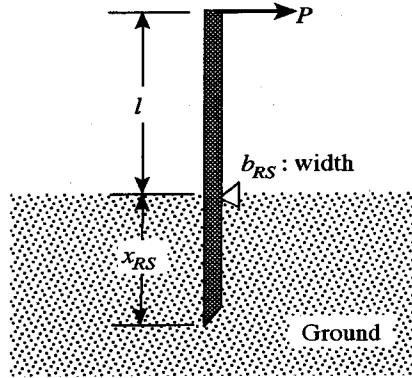


Fig.6 A method for determining the specific cutting resistance  $R_s$

一般にこれらの関係は、ばらつきが大きく密接な関係が存在するとはいえないが、両者を関係づける式もいくつか提案されている。ここでは、そのうち式(8)で表されるTerzaghi-Peckの提案式<sup>8)</sup>を用いることにする。

$$c = c_u = N/16 \text{ (kg/cm}^2\text{)} = 6.125 \times N \times 10^3 \text{ (N/m}^2\text{)} \quad (8)$$

$R_s$  とN値との関係は、式(5)と式(6), (7), (8)から求めることができる。よって、式(3), (4)の和として表される攪拌トルク  $T$  もN値の関数として表すことができる。

5. 攪拌トルクとN値の関係に関する計算

前述の考え方に従い、N値と攪拌トルクとの関係を計算により求めてみる。計算では、地盤のN値として5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50の10段階の値を入れ、これに対する攪拌トルクの値を上述の計算により求めた。その他のパラメータとしては以下のように設定した。

・攪拌翼の寸法などには実施工で用いられる改良機の諸元(下記)を、また地盤に関するパラメータには一般的な値を用いた。

- $r_2 = 0.05 \text{ m}$     $r_1 = 0.5 \text{ m}$     $\alpha_1 = 50 \text{ 度}$     $\alpha_2 = 80 \text{ 度}$
- $l_1 = 0.15 \text{ m}$     $l_2 = 0.15 \text{ m}$     $B = 1.0 \text{ m}$
- $\gamma = 1.8 \times 10^4 \text{ N/m}^3$     $c = 0 \text{ N/m}^2$  (砂・礫地盤)
- $\delta = 25 \text{ 度}$  (砂・礫地盤)    $6 \text{ 度}$  (粘土地盤)<sup>9)</sup>
- $K \tan \phi = 0.1785$  (砂・礫地盤),  $0.12$  (粘土地盤)
- $\phi = 0 \text{ 度}$  (粘土地盤)

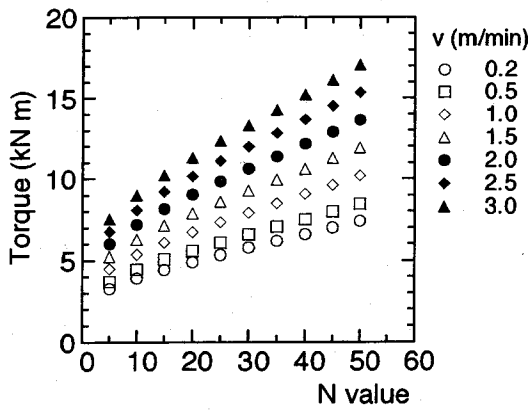


Fig. 7 Results of the calculation on the relationship between Torque and N value for sand ( $n=1$ )

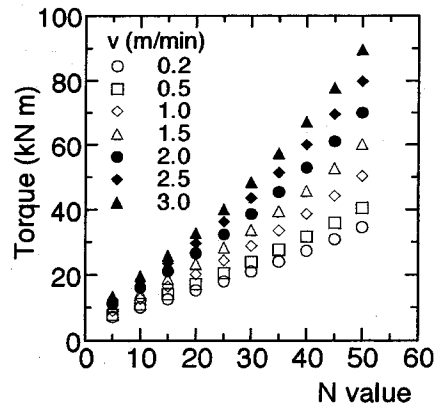


Fig. 9 Results of the calculation on the relationship between Torque and N value for sand ( $n=3$ )

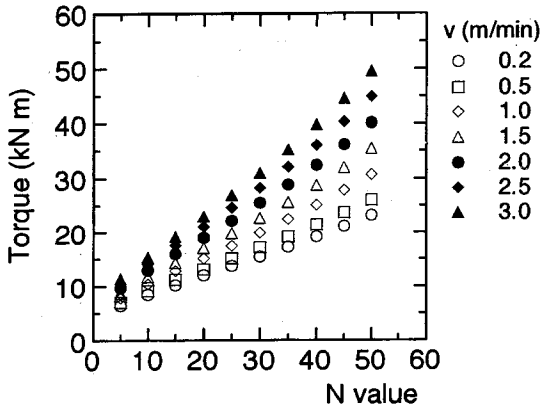


Fig. 8 Results of the calculation on the relationship between Torque and N value for sand ( $n=2$ )

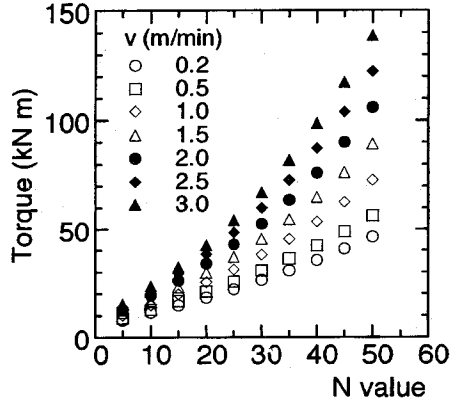


Fig. 10 Results of the calculation on the relationship between Torque and N value for sand ( $n=4$ )

- 貫入速度としては、0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 m/min の7段階に変化させて、攪拌トルク～N値関係に及ぼす貫入速度の影響を調べた。
- 施工条件のうち攪拌翼の回転速度は  $f=40$  回転/min で一定とした。これは実施工においては攪拌翼の回転速度を一定にしたままで施工を行うことが多く、地盤条件に対応させる必要がある場合には、貫入速度のみを変化させることが多いことを想定したためである。
- 深度  $z$  の値は、前述 c) の項で議論したようにある程度深くなれば影響を及ぼさなくなると考えられるが、ここでは一般的な値として  $z=10$  m を用いた。
- 攪拌による土の体積膨張に起因する圧力の増加倍率  $n$  の値としては現段階では特定することが困難であるため、ここでは1, 2, 3, 4の4段階に設定し、この値の計算結果に及ぼす影響を調べた。

Fig. 7～Fig. 10 は砂地盤を想定して、 $n=1, 2, 3, 4$  の場合の攪拌トルクとN値との関係を貫入速度を変えて求めたものである。これらの図より、攪拌トルクはN値と共に増加し、また両者の関係は攪拌翼の貫入速度により影響を受け、貫入速度が大きいほどトルクも大きくなることが読みとれる。攪拌トルク  $T$  (Nm) とN値との関係を直線とみなし、貫入速度  $v$  (m/min) の影響を考慮して、これらの関係を近似式で表すと以下の式が得られた。

$$\begin{aligned}
 n=1: & T = 41.89(v + 1.94)(N + 33.5) \\
 n=2: & T = 168.6(v + 4.05)(N + 1.97) + 3162 \\
 n=3: & T = 376.9(v + 1.41)(N - 2.17) + 4965 \\
 n=4: & T = 664.0(v + 1.07)(N - 5.02) + 6450
 \end{aligned} \tag{9}$$

これらの式の妥当性は、実施工で計測したデータをもとに後節で検討を行う。

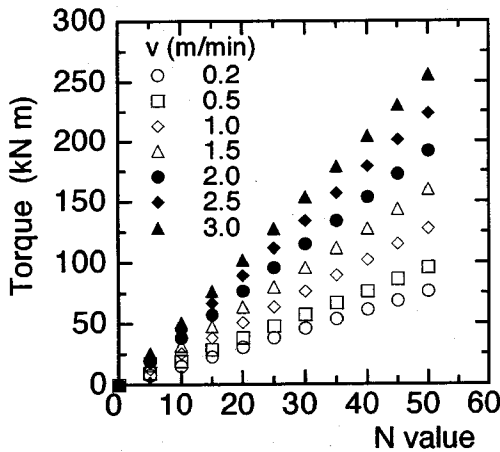


Fig. 11 Results of the calculation on the relationship between Torque and N value for clay

Fig. 11 は同じく粘土地盤について攪拌トルクとN値との関係を求めたものである。粘土地盤については、砂に比べ体積膨張に起因する圧力の増加が大きいと考え、この考慮は行っていない ( $n=1$  の場合についてのみ計算)。粘土地盤の場合にも攪拌トルクとN値との関係は比例関係にあり、両者の関係は貫入速度の影響を受けるという結果が得られた。粘土地盤についても砂地盤と同じくこれらの諸量の関係を式で表すと、次式の近似式が得られた。

$$n=1: T=1280(v+1.0)N \quad (10)$$

上記の考察から、砂、粘土いずれの場合にも攪拌トルク  $T$  と攪拌翼の貫入速度  $v$ 、ならびに地盤のN値との関係は次式で近似し得ることが予想される。

$$T=a(v+b)(N+c)+d \quad (a,b,c,d: \text{係数}) \quad (11)$$

## 6. 現場実験による検証

前節で得られた計算結果の妥当性を検証するため、実施工において攪拌トルク、貫入速度と地盤のN値とを計測し、計算結果との比較を行った。計測は、6現場18地点において攪拌翼に作用するトルクと攪拌翼の貫入速度を計測した。実験に先立ち計測地点、もしくはその近傍ではボーリング調査を行い、N値の深度分布を求め攪拌トルクの計測結果と比較した。

Fig. 12 は、計測結果の一例で、ある地点で計測された地中のN値、貫入速度、ならびに攪拌トルクを示している。同様のデータが18地点の計測地点について求められている。これらのデータを整理して、貫入速

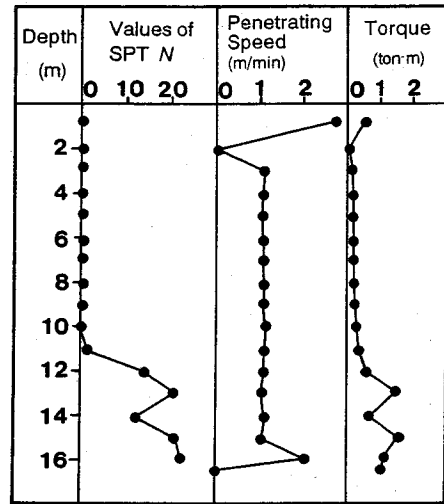


Fig. 12 An example of the data measured in the field experiments

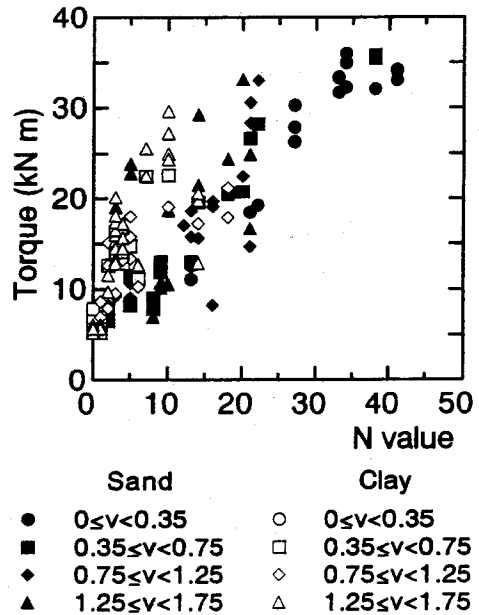


Fig. 13 The results of the field experiments

度別に攪拌トルクとN値との関係を整理するとFig. 13が得られた。これらの結果を前述の式(11)にならない定量化すると式(12)、(13)の関係が得られた。

$$\text{砂地盤: } T=401(v+2.0)(N+0.56)+1417 \quad (12)$$

$$\text{粘土地盤: } T=1200(v+2.0)N+2000 \quad (13)$$

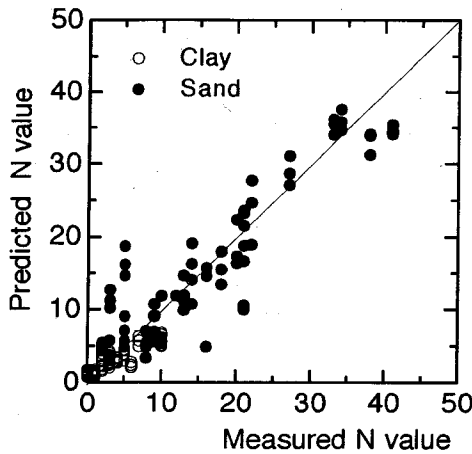


Fig. 14 Comparison of the measured N values and predicted ones

これらの式より、砂地盤、粘土地盤とも式中の係数の値は異なるが、式(11)と同じ形の関係式で攪拌トルク、貫入速度、地盤のN値間の関係が表されることがわかる。また、砂地盤においては、攪拌による土の体積膨張に起因する圧力の増加倍率  $n$  の値として2~3程度を想定すると実測値(式(12))と計算式(式(9)の  $n=2\sim 3$  の場合)が比較的一致するのではないかと考えられる。

Fig. 14 は、式(12)、(13)を用いて施工中の攪拌トルクと貫入速度から地盤のN値を推定し、これを実測N値と比較した結果である。この図より、バラツキは大きいものの、式(12)、(13)を用いると攪拌トルクと貫入速度を計測することによりその地盤のN値を推定することができることが読みとれる。ただし、推定に際しては地盤中の土が砂質土か粘性土かに応じて式(12)、(13)の使い分けを行わなければならないが、ここでは便宜上事前ボーリングの情報をもとに砂質土と粘性土の判別を行った。実際の施工ではリアルタイムでこの判別を行えることが望ましく、この点の改良が今後の課題といえる。

## 7. 地盤評価手法の自動化施工への応用

前章までで述べた手法により施工中に評価した地盤のN値を利用すると施工の合理化を図ることができる。例えば、最初に述べたように、施工中にN値をモニターすることができれば、支持層の確認も容易になり、また改良の対象となる地盤に応じて吐出する改良材の量を調整することにより、比較的均質な改良柱体を造成

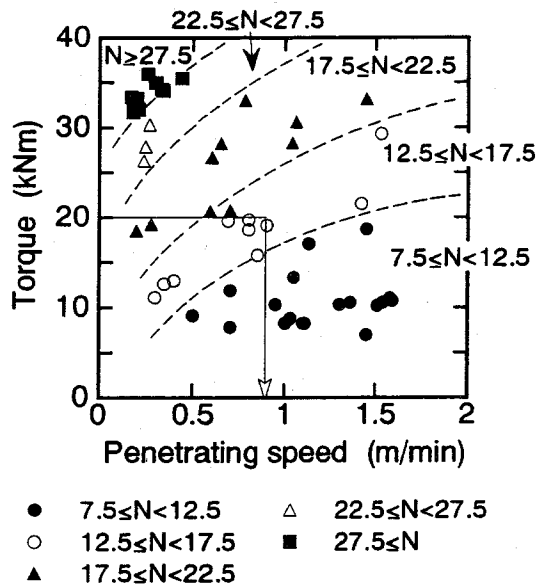


Fig. 15 The results of the field experiments on the relationship between Torque and Penetrating speed

することができる。この他、以下のような利用法も考えられる。

Fig. 15 は、前述の現場で得た砂地盤に関するデータを整理して、攪拌トルクと攪拌翼の鉛直方向の貫入速度をN値をパラメータとしてプロットしたものである。トルクと貫入速度との関係はバラツキはあるもののN値に依存してほぼ図中のようなゾーンに分けることができる。

実施工において攪拌翼の貫入中に地層が変化した場合には、それに応じてオペレータが貫入速度を調整している。これは硬い地層を攪拌する場合には、式(4)で表されるくい込みトルクが大きくなりすぎて貫入不可能になるため、貫入速度  $v$  を落とし(回転数  $f$  は通常一定)、1回転当たりの切り込み量  $v/f$  を小さくする必要があるからである。Fig. 15 と前述のN値の評価手法を用いるとこの操作を自動化することができる。たとえば、最大トルク20 kNmの機械を用いて施工を行ったところ、ある深さでのN値が先の推論手法により15と推定されたとする。すると、この深さにおける貫入速度の最大値は Fig. 15 より 0.9 m/min 程度と決めることができ、この貫入速度で施工を継続すればロスの少ない貫入を行うことができる。地盤条件は深さに応じて変化するので、貫入中にリアルタイムでこの操作を行う必要があり、これにより地盤特性に応じた施工を行うことができる。



## 8. おわりに

深層地盤改良工法において、施工中に攪拌翼に作用する攪拌トルク、貫入速度と地盤のN値との関係を理論的に考察した。ここでは、複雑な実現象を完全に数論的に取り扱うことができず、多くの仮定と経験式を用いざるを得なかったが、実施工で得られた計測結果をある程度表現できたと考えている。この議論を利用して、攪拌トルクと攪拌翼の貫入速度から地盤のN値を評価する手法を提案し、その適用性を考察したところ、バラツキはあるものの地盤のN値をリアルタイムで評価することが可能であるとの結果が得られた。既に発表しているファジー推論を利用した地盤評価手法<sup>3)</sup>と組み合わせればより信頼性の高い評価手法が構築できるものと考えられる。この結果を今後の施工に反映することにより、施工の合理化を推進することができ、また深層地盤改良の自動化が促進されるものと思われる。なお、この推定手法を実際の施工に適用していくには、信頼性の向上と現場で使用し得る形態へのとりまとめが必要である。今後ともデータを蓄積し、検証作業を行うとともに、現場で使える形態へのシステム化に取り組みたい。

謝辞：今回のデータ採取に協力いただいた各施工現場の関係者各位、ならびにデータのとりまとめ、解析に協力をいただいたD J M工法研究会施工検討委員会委員各位に深甚の謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 皇昭治郎, 檜垣義雄, 青井實, 芦田恵樹: 深層混合処理工法における計測施工に関する研究, 土木学会論文集, No.382/III-7, pp.35-44, 1987.
- 2) 青井實, 元吉誠: 深層混合処理工法における攪拌および貫入抵抗, 建設の機械化, No.420, pp.49-52, 1992.
- 3) 深川良一, 建山和由, 辻井剛: D J M工法におけるN値の推定, -ファジー推論の応用-, 建設の機械化, No.520, pp.42-47, 1993.
- 4) S.Hata: Submarine cable: multi-blade plough, *Geotechnique* 29, No.1, pp.73-90, 1979.
- 5) 皇昭治郎: 土と基礎・最近の工法, 土質工学会, 1965.
- 6) 福岡正巳, 村田清二, 今野誠: 新編土質力学, 国民科学社, pp.248-250, 1984.
- 7) 建山和由, 皇昭治郎, 納多勝: 比掘削抵抗 $R_s$ による締め施工管理について, 土木学会第37回年次学術講演会講演概要集, III-279, pp.555-556, 1982.
- 8) 土質工学会編: 土質調査試験結果の解釈と適用例, pp.49-61, 1981.
- 9) 畑村洋太郎, 千々岩健児: 土の切削機構の解明 (第4報, 切削に関与する土の性質について), 日本機械学会論文集 (第3部), pp.1606-1613, 42巻357号, 1976.

(1995.9. 27 受付)

## EVALUATION OF GROUND PROPERTIES IN DEEP SOIL IMPROVEMENT METHOD AND ITS APPLICATION TO AUTOMIZATION OF CONSTRUCTION

Kazuyoshi TATEYAMA, Ryoichi FUKAGAWA and Tsuyoshi TSUJII

As one of the studies on the automatization in the deep soil improvement method, theoretical and experimental studies were carried out to develop a method to estimate soil properties in real-time during construction. In the theoretical study, the resistance acting on the improving machines from the ground was studied with the soil cutting theory, and the relationship among the resistance and the ground properties was discussed. The results of the theoretical studies was examined through the field experiments and a method was suggested to evaluate the values of SPT of the ground, N values, with the loads acting on the machines from the ground. Some application of these soil-estimating methods to automatization in deep soil improvement method was discussed by determining the best operating method of the DJM machine according to the soil property estimated by the suggested method.