

鋭敏粘土地盤の深層混合改良に関するエネルギー的考察

西田耕一¹・三浦哲彦²

¹正会員 佐賀大学大学院 博士後期課程 システム生産科学専攻 (松尾建設株式会社)

²正会員 工博 佐賀大学教授 理工学部建設工学科 (〒840 佐賀市本庄町1)

本研究では、軟弱粘土地盤の深層混合改良での攪拌に伴う粘土の強度低下を考慮した攪拌トルクの算定法について有明粘土を対象に検討した。また、改良材の混合状態は攪拌に伴う粘土の強度低下特性に関係することを確認し、鋭敏比が高い粘土ほど改良材の混合度は高いことを明確にした。改良体の現場・室内強度比は一般に数分の1になるが、この原因の一つは攪拌エネルギーの違いによることを見出し、現場と室内における攪拌エネルギー比と改良強度比の関係を明らかにした。有明粘土地盤改良における改良材混合量と攪拌エネルギーおよび改良強度の関係を、施工費指数に基づいて論じ、経済的、合理的な施工条件を見出すための一つの手掛かりを与えた。

Key Words : soil improvement, sensitive clay, sensitivity ratio, degree of mixing, mixing energy, cost index

1. はじめに

近年、軟弱地盤改良工事においては、工期短縮の観点から固化材を用いた工法を採用することが多い。特に厚い粘土層を改良するための深層混合改良工法^{1),2)}が開発されて以来、工事量は着実に増加してきている。これらの地盤改良においては、地盤の違いや改良材の種類によって混合効果および改良効果に大きな違いを生じる。これらの効果への影響要因として、対象地盤の物理的、化学的、および鉱物学的性質があげられる。本報告では、粉体噴射攪拌工法 (DJM 工法) の有明粘土地盤への適用において、物理的要因の一つである攪拌による粘土地盤のせん断強度低下に注目し、これが固化材の混合状態におよぼす影響について論じ、また攪拌エネルギーと混合効果の関係について室内実験と現場施工データに基づいて考察する。また、施工における経済性について、攪拌エネルギーの観点から考察する。

2. 地盤強度に基づく攪拌トルクの推定

地盤の力学的特性に基づいて地盤改良機の種類選定ができたり、施工時に地盤特性の変化や混合効果を推定することができれば有意義である³⁾。1つの方法として攪拌軸に作用するトルク (以下攪拌トルクという) に注目した。攪拌トルクは地盤改良機が原地盤に与える仕事 (エネルギー) 量に関する指標の一つであり、直接的にはモーター電流の記録から知れる。ここでは、地盤の土質工学的特性に基づいて間接的に攪拌トルクを推定して、前者と比較検討した。

(1) 青井らによる算定法^{3),4)}

青井らは、DJM 工法の攪拌トルクを、翼の単位面積に加わる力 $P(x)$ を翼全長にわたって積分することにより次式で求めた³⁾。一段当たりの翼に加わるトルクは

$$T = 2 \int_0^{D/2} P(x) \cos \theta \cdot H \cdot dx = k_1 \cdot c_u^\alpha \cdot f^\beta \cdot D^{\beta+2} \cdot V^\gamma \quad (1)$$

ここに、 T : 攪拌トルク (N・m)、 θ : 貫入方向と水平面のなす角度 ($^\circ$)、 H : 翼の高さ (m)、 c_u : 粘土の粘着力 (N/m²)、 f : 回転数 (rpm)、 D : 翼径 (m)、 V : 貫入速度 (m/min)、 α , β , γ , k_1 : 実験より求めた定数

上式をもとに、二段翼を用いた場合の3つのケースについて T を求める式を導いている。

1) 改良材を入れずに攪拌した場合

$$T = (28.9 \sim 31.9) \cdot c_u \cdot D^{2.1} \cdot f^{0.4} (V + 2.4) \times 10^{-3} \quad (2)$$

2) 固化材としてセメントを混合した場合

$$T = 17.6 \cdot c_u \cdot D^{2.7} \cdot f^{0.4} (V + 2.4) (1 + 0.0092 W_c) \times \{1 + \delta(n-1)\} \times 10^{-3} \quad (3)$$

3) 固化材として生石灰を混合した場合

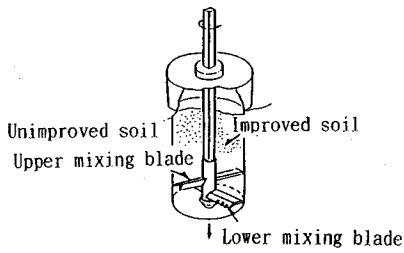
$$T = 17.6 \cdot c_u \cdot D^{2.7} \cdot f^{0.4} (V + 2.4) (1 + 0.020 W_L) \times \{1 + \delta(n-1)\} \times 10^{-3} \quad (4)$$

ここに、 n : 翼の段数、 δ : 翼の段数増加に伴う強度増加係数 (0.64~0.81)、 W_c : セメント混合量 (kg/m³)、 W_L : 生石灰混合量 (kg/m³)

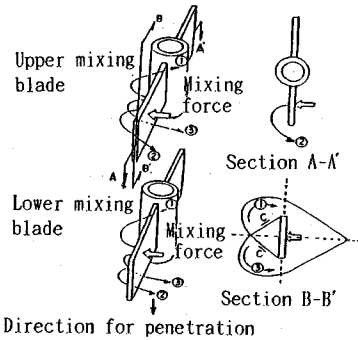
これらの式を有明粘土地盤に適用すると、電流値から算定した値をかなり上回る値となる。その原因の一つとして、翼の回転に伴う地盤の強度低下があると考えた。

(2) 地盤の強度低下を考慮した攪拌トルク⁵⁾

地盤の乱れによる強度低下と土被り圧による影響を考



(a) 攪拌翼の構造



(b) 攪拌翼に作用する力

図一 機械的攪拌混合機のトルク算定

慮した攪拌トルク計算方法を以下に検討する。攪拌翼の構造は図一 (a) に示すが、ここでは単純化のために翼の傾斜、貫入速度、回転速度の影響は考慮せず、翼が1/2回転した場合について次の二通りの方法で計算する。

一つは、現場での攪拌翼により押し出される粘土の動きが複雑なことを考慮して、テルツァギー修正式を用いる方法で、他の一つは、回転翼によってせん断される領域が明確に規定されている、ベーンせん断試験の計算式を用いる方法である。これらの適用方法について、以下に説明する。

a) 計算法1

図一 (b) に示すように、翼が回転した場合に地盤から極限支持力に相当する反力を受けるとして、テルツァギー修正式を用いる。

$$q_d = \alpha \cdot c_u \cdot N_c + \beta \cdot B \cdot \gamma' \cdot N_r + \gamma' \cdot D_f \cdot N_q \quad (5)$$

$$\alpha = 1, N_c = 5.3, N_r = 0, N_q = 1.0$$

ここに、 γ' : 土の水中重量、 B : 基礎底面の幅 (m)、 D_f : 基礎の根入れ深さ (ここでは地表面からの攪拌翼の深さ Z とする)

攪拌トルク T は、翼の単位面積に加わる力に軸中心からの距離を乗じた量を翼全長にわたって積分すれば良い。攪拌トルク T (N・m) は次式より求める。

$$T = 2 \int_0^{D/2} q_d \cdot H \cdot dx = 2(1.0 \times 5.3 c_u + \gamma' Z) \frac{X^2}{2} \cdot H \quad (6)$$

ここに、 X : 攪拌軸から翼先端までの距離 (m)、 H : 翼の高さ (m)、 c_u : 不攪乱地盤の粘着力 (N/m²)

図一 (b) に示すように、翼に押された粘土は①②③の3方向に向かおうとする。矢印方向に攪拌軸が貫入する時、下段翼により押し出された粘土を受けとめる地盤は、①方向では攪乱状態、②③方向では不攪乱状態と仮定する。これらの地盤の攪乱状態と不攪乱状態の面積比率は、ほぼ1:1となる。攪乱地盤の粘着力 c_{ur} は、鋭敏比 S_t を用いて $c_{ur} = c_u/S_t$ で評価できると考えると、下段翼の周辺における地盤の粘着力 c_{u1} は以下のようになる。

$$c_{u1} = (c_u + c_{ur})/2 = c_u \cdot (1 + 1/S_t)/2 \quad (7)$$

攪乱地盤の強度低下は鋭敏比の大小で示されるが、有明粘土の鋭敏比は深度方向に増加するので、深い位置での粘土の攪乱強度と地表面付近の粘土の攪乱強度はそれほど大差はないと考えられる。そこで c_u/S_t は地表面付近の粘土の値を用いた。

上段翼では、翼の上下面の粘土は完全に攪乱されているので、押し出される粘土は乱れた地盤に向かおうとする。そこで、周辺地盤の粘着力 c_{u2} は攪乱状態とみなすと、

$$c_{u2} = c_{ur} = c_u/S_t \quad (8)$$

攪拌トルクは、上段と下段の攪拌翼において計算したトルクを加えたものである。

b) 計算法2

ベーンせん断試験における最大モーメント算定式を用いて、翼の上下面と周面のせん断抵抗から攪拌トルクを推定する。地盤のせん断抵抗が地盤の粘着力 c_u (N/m²) に等しいとすれば、ベーンせん断試験の最大モーメント M_{max} (N・m) は次式で与えられる。

$$M_{max} = (2\pi \cdot H \cdot R^2 \cdot c_u + \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R^3 \cdot c_u) \quad (9)$$

ここに、 H : 翼の高さ (m)、 R : 翼径 (m)、

攪拌翼の貫入速度が V m/min の場合、貫入時の標準的な回転数は 32 rpm であるので、半回転で貫入する深さは $1/2 \cdot V/32$ m = $V/64$ m となる。この状態では下段翼は高さ $V/64$ m だけが不攪乱地盤内にあり、残り ($H - V/64$) m と上段翼は乱れた地盤の中 ($c_{ur} = c_u/S_t$) にある。

各翼がせん断する地盤の強度評価において、乱れによる強度低下を考慮すると、下段翼で

$$M_{max1} = \left[2\pi \cdot \left\{ \frac{V}{64} \cdot c_u + \left(H - \frac{V}{64} \right) \cdot \frac{c_u}{S_t} \right\} \cdot R^2 + \frac{2}{3} \pi \cdot R^3 \times \left(c_u + \frac{c_u}{S_t} \right) \right] \quad (10)$$

上段翼に対しては、

$$M_{max2} = \left\{ 2\pi \cdot H \cdot \frac{c_u}{S_t} \cdot R^2 + \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R^3 \cdot \frac{c_u}{S_t} \right\} \quad (11)$$

よって攪拌トルク T (N・m) は、

$$T = M_{max1} + M_{max2} \quad (12)$$

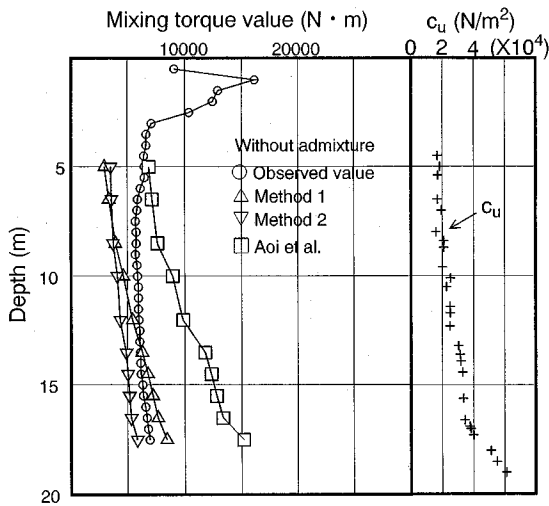


図-2 攪拌トルクの計算値と測定値との比較
(改良材を混合しない場合)

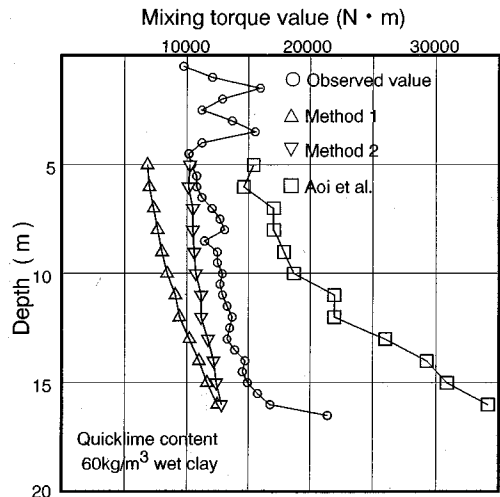


図-4 攪拌トルクの計算値と測定値との比較
(生石灰 60 kg/m³を混合した場合)

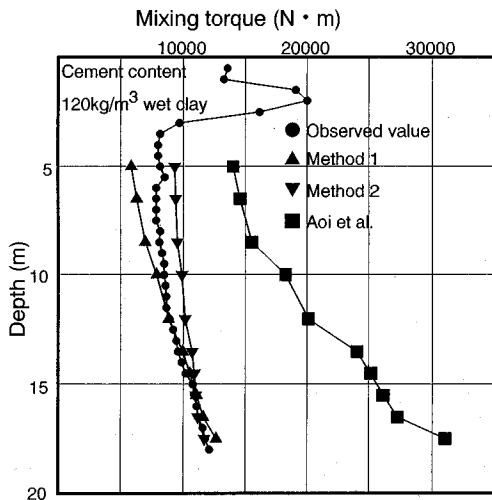


図-3 攪拌トルクの計算値と測定値との比較
(セメント 120 kg/m³を混合した場合)

表-1 実験に用いた粘土試料の物理的性質

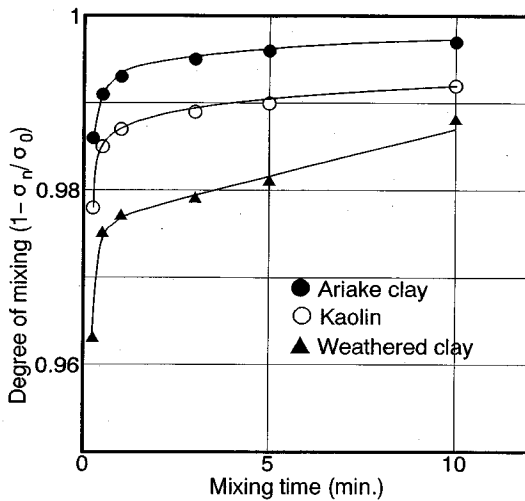
Property	Type	Ariake clay	Weathered clay	Kaolin
Density of soil particles ρ (g/cm³)		2.730	2.691	2.705
Water content w (%)		120.0	71.0	60.0
Wet density ρ_t (g/cm³)		1.370	1.526	1.539
Liquid limit W_L (%)		85.9	84.0	50.0
Plastic limit W_P (%)		37.7	34.0	27.1
Plasticity index IP (%)		48.2	50.0	22.9
Liquidity index IL (%)		1.71	0.74	1.44

(3) モーター電流から換算したトルクとの比較

有明粘土地盤において、改良材を混合しない場合について、地盤強度に基づいて計算した攪拌トルクと、記録されたモーター電流に基づきモーター固有のトルク～電流曲線から求めたトルク（以下電流換算トルクという）を比較したものが図-2である。計算では鋭敏比 $S_r = 15$ 、粘着力は実測値を用いた。同図で示されるように、地盤の乱れを考慮した計算法1と計算法2ではどちらも電流換算トルクに近いことがわかった。計算法1、2は、攪拌翼の動きにそのまま適用することはできないが、実測値とそれほど大きく変わらないことから、攪拌トルク推定のための一次近似としてこれを使ってもよいことが確

認できた。

次に粉状の改良材を粘土地盤中に混合した場合について検討を行う。セメントと生石灰を貫入吐出した場合の電流換算トルクと、式(3)、(4)、ならびに計算法1および2による計算値を比較したものが図-3、4である。計算に用いた S_r は15であるが、攪拌により地盤が乱れて強度が低下しても石灰・セメントを加えることにより強度が増加するので、式中の c_{ur} はその時の強度増加を考慮した値を用いる。これらの図に示されるように、攪拌による地盤強度低下を考慮した計算方法は電流換算トルクに近い。



図一五 攪拌時間と混合度 $(1 - \sigma_n / \sigma_0)$ の関係

3. 混合効果に関する基礎的検討

2章において、攪拌時の地盤の乱れが攪拌トルクに大きな影響を与えることを示した。攪拌に伴う地盤の乱れは、固化材と粘土の混合度の観点からみると改良効果を上げることが考えられる。このことを確認するために、3種類の粘土に着色した円筒状のプラスチックビーズ（直径1 mm、長さ2 mm、密度1.2 g/cm³）を混合して、混合効果を比較検討した。使用した粘土は、佐賀県川副町で採集した有明粘土、同地区の低鋭敏性の風化表土、およびカオリンであり、それらの物性と実験条件は表一1に示している。実験方法は、1000 cm³の粘土に1200個のプラスチックビーズを加え、ホバート型ソイルミキサーで所定の時間混合し、12個に仕切った容器に流し込み、各仕切内のビーズの個数を数えた。混合効果の評価は偏差より求めた次式による混合度⁷⁾を用いた。

$$\text{混合度} = 1 - \sigma_n / \sigma_0 \quad (13)$$

ここに、 $\sigma_n = \sqrt{1/n \sum (C_i - C)^2}$
 $\sigma_0 = \sqrt{A(1-A)^2 + (1-A)(0-A)^2} = \sqrt{A(1-A)} = \sqrt{AB}$

$$C_i = 100 / \{1 + (w_B / w_A)(\rho_A / \rho_B)\}$$

$$C = 100 / \{1 + (W_B / W_A)(\rho_A / \rho_B)\}$$

w_A : サンプル中の粘土の重量、

w_B : サンプル中のビーズの重量、

W_A : 粘土の全重量、 W_B : ビーズの全重量、

ρ_A : 粘土の湿潤密度、 ρ_B : ビーズの密度、

A : 粘土の容積/全容積×100、

B : ビーズの容積/全容積×100

上式で算定した各粘土についての混合度と攪拌時間の関係を図一5に示す。この図で見られるように、有明粘土の混合度は他の粘土に比べて高い値を示している。す

なわち、同じ攪拌時間では有明粘土は最も高い混合効果が得られることを示している。特に攪拌時間が短い場合に混合度の差が大きい。これらの粘土の鋭敏比は有明粘土で $S_t = 15$ 、風化表土で $S_t = 4$ である。上述の実験により、鋭敏比が高い粘土ほど、改良材の混合効果は高いことが示された。この結果より、改良材の混合度が高いことが、有明粘土地盤の改良において生石灰が有効とされる⁸⁾要因の一つであるといえる。

4. 攪拌エネルギーと改良効果の関係

地盤改良の設計にあたっては、事前に原位置の土を用いて室内混合試験を行うことが多い。同量の改良材添加において室内強度と現場強度との間には一般に数倍の差が生じるという経験に基づいて、現場での改良材混合量は決定される⁹⁾。有明粘土では一般に現場・室内強度比として1/3を用いることが多い¹⁰⁾。室内強度と現場強度に差が生じるのは、室内混合では均一な混合が期待できるのに対して、現場では地盤特性の変化、固化材供給の変動、地盤改良機の作業性の変化など不確定要素が多いからであると考えてきた。しかし、現場において攪拌翼の回転数や貫入・引抜き速度を変化させると、混合効果に明らかに違いが生じることがわかっている¹⁰⁾。すなわち攪拌エネルギーの大小によって改良効果の違いを生じるということである。そこで現場強度と室内強度の差が生じる原因を攪拌エネルギーの観点から以下に考察する。

(1) ソイルミキサーによる攪拌エネルギー

ホバート型ソイルミキサーに不攪乱状態の有明粘土を極力乱さないように詰め込み、生石灰10%を混合した場合の攪拌エネルギーをクランプテストで電流 A ・電圧 V を測定して求めた。すなわち、所定の時間間隔 t_i (ここでは5 sec)ごとに電流 A_i 、電圧 V_i を読みとり、その積算値として次式より粘土1 m³当たりの攪拌エネルギー E を求めた。

$$E = \left(\sum_{i=1}^n A_i \times V_i \times t_i \right) / V_c \quad (14)$$

ここに、 V_c : ソイルミキサー中の粘土の容積

1 m³当たりの攪拌エネルギーの累積値は、図一6に示すように攪拌時間の増加に伴って比例関係から離れる傾向が認められた。攪拌エネルギーと対応する改良土の一軸圧縮強さの関係を調べたものが図一7である。攪拌エネルギーの増加に従い強度も増加するが、ある攪拌エネルギーを越えるとその後の強度増加率は低下する。このことは攪拌エネルギーの効率が最も高くなる攪拌時間が存在することを示すものである。本実験で用いたソイルミキサーの場合は3分間程度攪拌したときに変曲点に達することがわかった。すなわち、有明粘土を用いて室内混

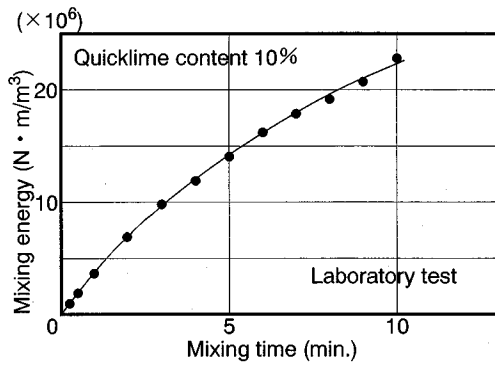


図-6 単位体積当りの攪拌エネルギーの累積値
(室内試験：生石灰10%混合)

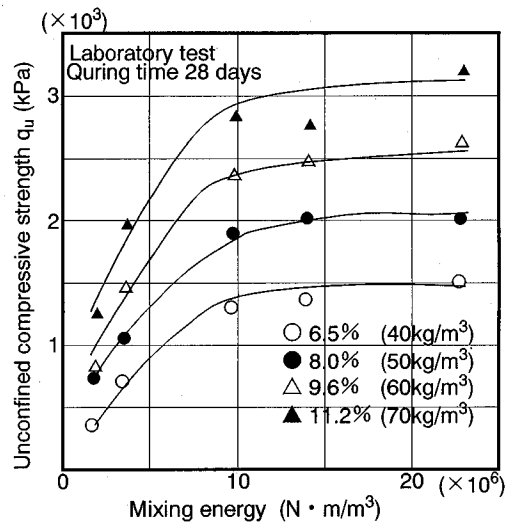


図-7 攪拌エネルギーと改良土の一軸圧縮強さ q_u の関係
(28日間養生)

合試験を行う場合は、3分間混合すれば通常行う10分間混合とそれほど変わらない改良効果が得られる^{11),12)}。

(2) 現場施工における攪拌エネルギー

図-8は、DJM工法で生石灰を10%混合した場合の攪拌エネルギーのデータである。実測されたモーター電流からわかる攪拌トルク T と攪拌翼回転数 n を基に所要動力を求め、粘土 1 m^3 を攪拌するのに費やす時間 t (sec) を乗じたものが粘土 1 m^3 当りに加えた現場攪拌エネルギー(以下 E_f とする)であり、次式により示される。

$$E_f = (2\pi \cdot n \cdot T / 60) \times t \quad (15)$$

比較のためソイルミキサーを用いた室内攪拌エネルギー(以下 E_l とし後に攪拌時間を添え書きする)も図中に示している。この結果、ソイルミキサーで1分間の攪拌混

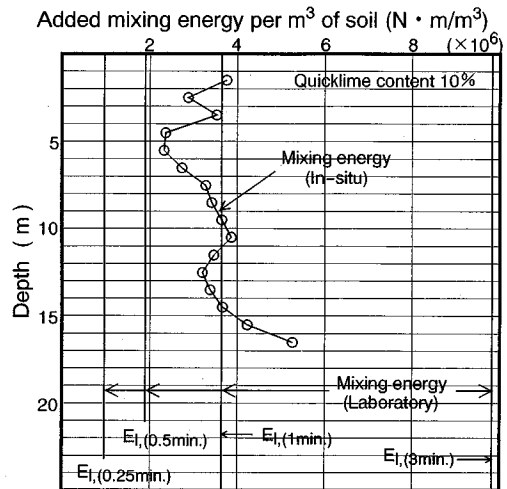


図-8 現場攪拌エネルギーの深度分布
(生石灰10%混合)

表-2 攪拌エネルギー比 E_f/E_l

Mixing time in Laboratory Depth(m)	1	2	3	4	5	10
-3~-6	0.75	0.39	0.28	0.23	0.19	0.12
-6~-8	0.82	0.43	0.31	0.25	0.21	0.13
-8~-10	0.96	0.51	0.36	0.30	0.25	0.15
-10~-12	1.00	0.53	0.37	0.31	0.26	0.16
-12~-14	0.89	0.47	0.33	0.28	0.23	0.14
-14~-17	1.19	0.63	0.45	0.37	0.31	0.19
Average	0.94	0.49	0.35	0.29	0.24	0.15

合を行ったときの $E_{l(1min)}$ は通常での E_f とほぼ等しくなることがわかった。

表-2に示した数値は、深度ごとの E_f と攪拌時間を1分から10分まで変化させた場合の E_l との比を示している。これは、攪拌エネルギーの現場と室内の比を算定して現場・室内強度比に対応させることにより、攪拌エネルギーと現場での混合効果の関係を知らうとするものである。

図-8の現場攪拌エネルギーに対応する現場強度(以下 q_{uf} とする)と各深度ごとの有明粘土の室内混合試験強度(以下 q_{ui} とし後に攪拌時間を添え書きする)を比較したものが図-9である。室内混合攪拌時間は1分間と10分間であり、図中の数値は現場と室内の強度比 q_{uf}/q_{ui} を示す。 $q_{uf}/q_{ui(10min)}$ が $0.38 \sim 0.54$ の範囲であるのに対して1分間混合での $q_{uf}/q_{ui(1min)}$ は $0.89 \sim 1.08$ の値を示しており、現場と室内の強度差はそれほど生じない。上

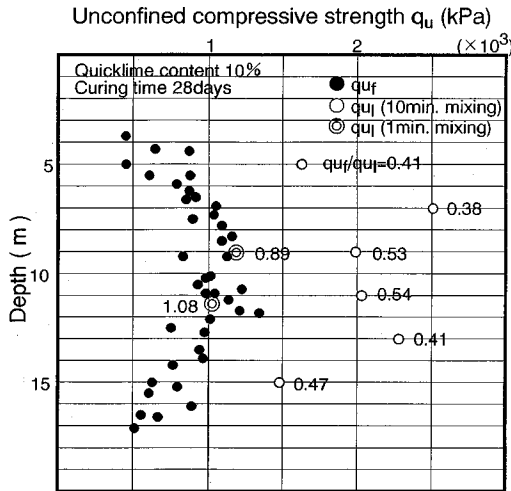


図-9 改良土の現場強度と室内混合試験強度の比較

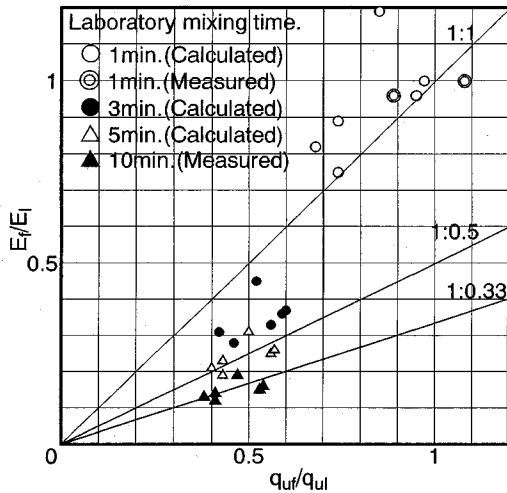


図-10 改良土の強度および攪拌エネルギーに関する現場/室内試験の比

記の検討により、室内と現場での混合効果の違いの主な原因は、室内攪拌エネルギーと現場攪拌エネルギーの差によることが明らかとなった。

(3) 攪拌エネルギー比と強度比との関係

以上のことをまとめて、 q_w/q_{ui} とそれに対応する E_f/E_i の関係を示すのが図-10である。この図に用いた q_{ui} は、実験値以外に、10分間混合により作製した供試体の強度を基にして図-7の強度低下率から算定した値も含んでいる。 E_f が増加すれば q_w も増加しており q_w/q_{ui} と E_f/E_i は比例関係にある。特に室内で1分間程度混合した場合に $q_w/q_{ui(1min.)} \approx E_f/E_{i(1min.)} \approx 1$ となることがわかる。このことは、 $E_{i(1min.)}$ とその時の $q_{ui(1min.)}$ が

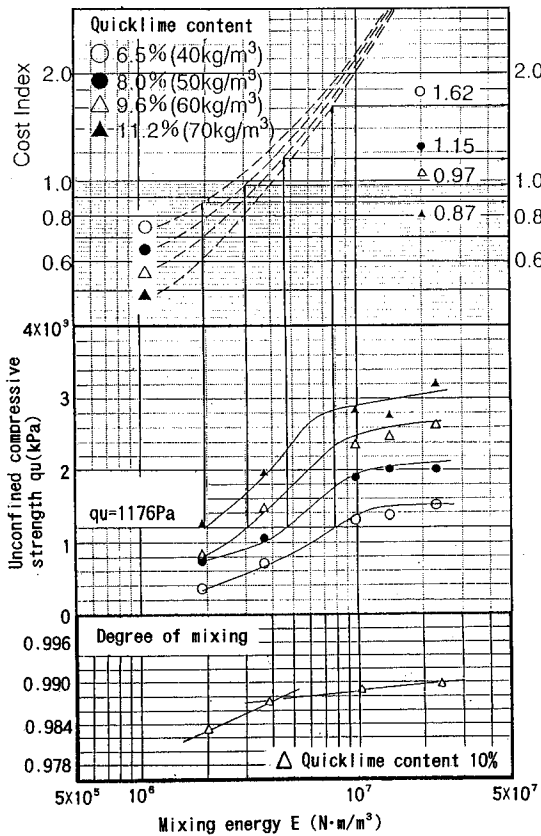
わかれば E_f の値から q_w が推定できることを示している。

従来の室内混合試験¹²⁾では、ソイルミキサーで10分間混合を行うため、 $E_f/E_{i(10min.)} = 3.4/22.9 = 0.15$ とかなり小さな値になる。それに伴い現場・室内強度比も小さい値になると考えられたが、実際の施工結果では図-9で示すようにそれほど小さくはならず0.38~0.54となっている。これは、前節で述べたように3分以上の攪拌では攪拌エネルギーの効率が限界値に近づくためである。現場混合強度と通常行われている10分間攪拌での室内混合強度との比 $q_w/q_{ui(10min.)}$ は $q_w/q_{ui(3min.)}$ に近い値を示し、このときの攪拌エネルギー比 $E_f/E_{i(3min.)}$ は1/2~1/3となる。ゆえに有明粘土地盤改良で現在用いられている強度比1/3は、攪拌エネルギーという観点からも十分に納得できる値である。

5. 最適混合条件に関する考察

すでに述べたように、改良材の選定や使用量は室内試験に基づいて決定されるが、地盤改良機の攪拌時間に関しては現場において経験的に決められている。そこで粉体を用いた地盤改良の施工費において、改良材使用量と攪拌エネルギー、および混合効果の面から最適条件について考察する。

図-11に、生石灰を用いたDJM工法による有明粘土地盤改良での一軸圧縮強さと攪拌エネルギー、および施工費指数(Cost Index)を示す。施工費指数とは、8%の生石灰を混合した場合の標準施工費¹³⁾を基準として混合量を変えた場合の施工費の割合を意味する。生石灰混合量が6.5, 8.0, 9.6, 11.2%(湿潤粘土1 m³当たり40, 50, 60, 70 kgに相当する)の場合について、攪拌エネルギーに対応する一軸圧縮強さと施工費を比較している。生石灰混合量が一定の場合、攪拌エネルギーを増加させると一軸圧縮強さは増加し、攪拌エネルギー一定の場合は混合量を増加することにより一軸圧縮強さは増加する。図中に示すように目標強度を $q_u = 1176$ kPaとする場合、混合量が6.5%ならば施工費指数は1.62となるが、混合量11.2%では攪拌エネルギーが少なく済むために0.87となる。ゆえに、攪拌エネルギーを増やすより改良材を増加させる方が経済的であることがわかる。このように、所定の強度を得るためには、攪拌エネルギーを増やすよりも改良材を多く用いるのが効果的ということになる。しかし現場施工においてはこれだけで決定することはできない。攪拌エネルギーを小さくすると品質のばらつきが大きくなり、改良材の増加により発生泥土が増える。そこで最適な混合条件を知るために、生石灰を10%添加した有明粘土にプラスチックビーズを加え、その混合度に関するデータを図-11に加えて検討した。



図一11 DJM 工法における改良強度 q_u 、攪拌エネルギー E 、施工指数 (Cost Index) の関係 (有明粘土)

攪拌エネルギーは電力の測定値に基づいて算出した。現場攪拌では、品質の面から混合度が安定するときの攪拌エネルギーが最小限必要となる。この状態での攪拌エネルギーは、今回用いたソイルミキサーで1分間混合したときのエネルギーにほぼ等しく、約 $3.8 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{m}^3$ となる。現場においては、品質の安定を図るため、改良材混合量の違いに関わらずこれ以上の攪拌エネルギーを与えねばならない。すなわち、それが可能となる施工速度を設定する必要がある、その範囲において一層経済的な改良材混合量と攪拌エネルギーの組み合わせを考えるべきである。ちなみに、 $3.8 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{m}^3$ という攪拌エネルギーは、DJM 工法における通常施工での現場攪拌エネルギーに相当しており、このことは、有明粘土地盤での DJM 工法において、現行の貫入・引抜き速度は経済性と品質の安定性において合理的であることを示している。

6. 結 論

有明粘土地盤の改良において、粘土の鋭敏比と攪拌エネルギーが混合効果に及ぼす影響について検討した結

果、以下の結論を得た。

(1) 地盤改良において、地盤強度に基づく攪拌トルクの算定を行う場合、攪拌による地盤の乱れを考慮する必要があることを示し、計算結果がモーター電流から換算したトルクに比較的近い値を示すことがわかった。

(2) 粘土地盤改良で混合効果に影響を与える物理的要因の一つとして、鋭敏比の高さを挙げることができる。鋭敏比が高い有明粘土では、鋭敏比が低い粘土の場合に比べて、改良材が均一に混合していることがわかった。このことは、有明粘土地盤の改良において、少量の生石灰添加による混合でも効果が高いことの一つの理由であるとえられる。

(3) 攪拌エネルギーと改良強度の関係から、攪拌エネルギーの効率が最も高くなる攪拌時間が存在することがわかった。本実験で用いたソイルミキサーでは3分間の攪拌混合に当たり、有明粘土の室内混合試験を行う場合、3分間混合すれば通常行われる10分間混合と変わらない改良強度を得ることができる。

(4) 有明粘土地盤改良において、改良材混合量の設計で一般に用いられる現場・室内強度比 $q_w/q_{ui}=1/3$ という値は攪拌エネルギーの観点から妥当である。DJM 工法では、室内混合時間が1分間の場合 $q_w/q_{ui} \approx E_f/E_i \approx 1$ の関係が成立すると考えられ、室内混合試験と現場攪拌エネルギーから現場強度を推定できる。

(5) DJM 工法で必要な施工費について、改良材混合量、攪拌エネルギーおよび混合効果の面から検討した。その結果施工費指数という観点からは、攪拌エネルギーを増やすより改良材を増加させる方が効果的であることがわかった。しかし、周辺地盤環境への影響を考えると過度の改良材添加は好ましくなく、所定の強度が得られる範囲で改良材の使用量を最小限にとどめ、大きめの攪拌エネルギーをあたえる方が望ましい。

このように地盤改良においては、施工費に直接関係する経済性 (例えば改良材混合量や攪拌エネルギーの消費量などに関する問題) だけではなく、周辺環境への影響やメンテナンスの周期、よりクリーンな現場環境の維持など、総合的な視野からより合理的な工法選択を行うべきであろう。

謝辞：本報告をまとめるに当たり御意見を賜った佐賀大学農学部の甲本達也教授と九州大学工学部高尾征治博士に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 福岡正巳：最新の軟弱地盤処理工法，近代図書，pp. 48-62，1982。
- 2) 千田昌平：粉体噴射攪拌工法，軟弱地盤改良工法に関する現状と動向講演会講演資料，土質工学会，pp.69-76，

- 1982.
- 3) 青井実, 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 85・2, pp.49-52, 1985.
 - 4) 土質工学会編: 地盤改良のトラブルの要因とその対策, pp.202-203, 1993.
 - 5) 西田耕一, 辻 忠昭, 三浦哲彦: 地盤改良における攪拌混合効果に関する一考察, 佐賀大学理工学部集報, Vol. 22, No. 2, pp.263-270, 1994.
 - 6) M. Ohtsubo, M. Takayama and K. Egashira: Mineralogy, chemistry, and geotechnical properties of Ariake marine clays, *Proceedings of International Symposium on Shallow Sea and Low Land*, pp.145-150, 1988.
 - 7) 日本粉体工業協会編: 混合混練技術, pp.4-10, 1980.
 - 8) DJM 工法研究会: 粉体噴射攪拌工法技術マニュアル, 1993.
 - 9) (社)セメント協会編: セメント系固化材による地盤改良マニュアル, pp.51-53, 1985.
 - 10) 三浦哲彦, 古賀良治, 西田耕一: 有明粘土地盤に対する生石灰を用いた深層混合処理工法の適用, 土と基礎, Vol. 34, No. 4, pp.5-11, 1986.
 - 11) 千田昌平, 村尾好昭, 岩瀬真二: 粉体噴射攪拌工法によるピート改良土の特性, 第17回土質工学研究発表会, pp. 2589-2592, 1982.
 - 12) 土質工学会編: 安定処理土の締固めをしない供試体作製, 土質試験の方法と解説, pp.255-262, 1990.
 - 13) 粉体噴射攪拌工法研究会: 粉体噴射攪拌工法標準積算資料, 1992.
- (1994.8.19 受付)

STUDY OF THE MIXING ENERGY ON THE DEEP MIXING IMPROVEMENT OF SENSITIVE CLAY

Koichi NISHIDA and Norihiko MIURA

This paper investigates the methods of calculating the mixing torque for the deep mixing improvement of sensitive soft clay. It is noticed that for higher sensitivity ratio, the degree of mixing is better. Normally, the improved strength ratio of clay from the field and laboratory investigations ranges from 1/2 to 1/5. The present study suggests that this is due mainly to the difference of the applied mixing energy. The strength ratio can be illustrated from a viewpoint of mixing energy ratio. An economical and reasonable work execution is established based on the relationship of the chemical agent content, mixing energy, and improved strength.