

セメント処理杭の力学特性に及ぼす搅拌条件の影響に関する基礎的研究

FUNDAMENTAL STUDY OF MIXING CONDITIONS AFFECTING
THE MECHANICAL PROPERTIES OF SOIL-CEMENT PILES

室 達朗*・深川良一**・向畠和男***

By Tatsuro MURO, Ryoichi FUKAGAWA

and Kazuo MUKAIHATA

To clarify the effects of several factors; revolution speed, total number of revolution of mixing blade, mixing energy, etc. on the physical properties of cement treated clay, a series of basic tests using cement and kaolinite were conducted for specimens formed by a plane mixing of which the mixing continues at the same place. Especially, the degree of mixing estimated from hydrogen-gas measurement method was proposed and its availability was quantitatively investigated. Next, the improved model column formed by a practical mixing method was presented to an unconfined compression test to check the effects of some factors on the unconfined compressive strength and the modulus of deformation from the point of the pitch and the mixing energy.

Keywords : soil-cement pile, degree of mixing, revolution speed, unconfined compressive strength, modulus of deformation

1. まえがき

深層混合処理工法における陸上工事でのセメント処理杭の現場強度は、室内強度の1/2～1/5程度であり、かつばらつきが非常に大きいと報告されている^{1), 2)}。その品質管理の方法としては、地盤の改良前のサンプリングデータおよびセメント処理杭の打設後に得られる各種データを用いて品質管理を行おうとするもの³⁾、強度発現が土の種類やその状態によって大きく左右されることを考慮し、施工中に原地盤の把握が行えるように、搅拌翼の貫入時に得られる掘削トルク、貫入抵抗と原地盤の強度や土の種類との関係を検討し、施工精度を確認するもの⁴⁾、セメント処理粘土の強度・変形特性を規定する要因をおさえ、それに対して的確な施工をめざすもの⁵⁾がある。本研究は、セメント処理粘土の強度・変形特性を規定する重要な要因として、固化材と地盤材料との混合状態に注目し、まず、実施工における改良柱体の打設におけるいくつかの要因を除いた基本的な状態を仮想し、同一平面内で繰り返し搅拌混合を行う平面搅拌について室内実験を行っている。ここで混合状態を混合度⁶⁾によ

り評価し、混合度に影響を与える要因として飽和したカオリン粘土の含水比、搅拌回転速度、搅拌回転数に着目し混合度と上記要因との関係を調べた。また、搅拌時のトルクを測定し、エネルギー的に混合度を評価するとともに、平面搅拌条件下での混合度とカオリン粘土と普通ポルトランドセメントとの混合土の強度・変形特性との関係を調べた。次に、実施工を模して搅拌翼からセメントスラリーを吐出させて室内モデル杭を打設し、ピッチと搅拌回転速度および昇降回数に着目し、強度・変形特性を明らかにした。また打設時のトルクから単位体積当たりの搅拌エネルギーを求め、強度・変形特性との関係を明らかにし、混合度とともに、施工管理の方法について考察した。

2. 搅拌状態の評価

混合状態を評価する方法は、間接的評価法と直接的評価法に大別される。前者は、羽根切り回数、混練り回数などから混合状態を評価するものであり、後者はカルシウム含有量、非晶質成分量、色砂の含有量などを実測することにより、混合土の混合状態を推定し、混合土の強度・変形特性との関係を調べるものである。後者は、いずれも混合状態を直接的に表現しており、固化材特性、地盤条件、施工条件の各条件に強く依存している点で、

* 正会員 工博 愛媛大学教授 工学部海洋工学科
(〒790 松山市文京町3)

** 正会員 工博 愛媛大学講師 (同上)

*** 学生会員 愛媛大学大学院生 (同上)

単回帰分析より求めた $R \sim \alpha$ 曲線である。いずれの含水比においても搅拌翼の全回転数の増加とともに混合度は高くなり、 $R=80$ 回程度でほぼ収束している。また $R=200$ 回という高回転数においては、搅拌回転速度の違いによらず同程度の混合状態が得られることを示している。搅拌回転速度 ω が 20 rpm では、同図実線に示すように、搅拌翼の全回転数によらず、高い混合度を示しており、このことは他の含水比 $W_A=80, 100\%$ についてもいえる⁹⁾。このことから、混合度が最大となる最適な搅拌回転速度は、搅拌に要する時間を度外視すれば、本実験においては 20 rpm であることがわかる。ただし、実施工においては施工速度が追究されるので短時間に所定の α 値に到達させるため多少のエネルギー増加となっても搅拌回転速度はさらに増大させるべきであるとする立場もある。今回得られたデータに対して重回帰分析を行った。以下に混合度 α と A 材料の含水比 $W_A(\%)$ 、搅拌回転速度 $\omega(\text{rpm})$ 、搅拌翼の全回転数 R 回の関係を示す。

$$\alpha = 0.104 W_A^{0.459} \omega^{-0.131} R^{0.129} \dots \quad (2)$$

(重相関係数 : 0.758)

式 (2) による α は $70 \leq W_A(\%) \leq 100$, $20 \leq \omega(\text{rpm}) \leq 60$, $0 \leq R \leq 200$ 回のデータをもとに決定されたものである。搅拌回転速度が大きくなるほど、いずれの含水比においても特に低回転数域では混合度は低い値を示している。これは、粘土の力学挙動の時間依存性が影響を与えていたものと考えられる。平面搅拌は同一地点での回転搅拌であるため、回転速度が大きいほど搅拌翼の上下両面によりせん断される土量が少なくなってくる。また回転速度が大きいほど、翼後方に負圧による共回り的要素が大きくなってくることも考えられる。これらはいずれも混合度の低下の原因となる。

(4) 混合度と搅拌エネルギー

搅拌に要した搅拌エネルギーと仕事率を求め、混合度との関係を明らかにするため、各搅拌回転速度ごとに搅拌トルクを測定した。いずれの搅拌回転速度においても、トルクは $R=10$ 回程度で収束している⁹⁾。搅拌エネルギー $E(\text{N} \cdot \text{m})$ は、搅拌トルクを $T(\text{N} \cdot \text{m})$ 、搅拌翼の全回転数を R 回とすると

$$E(\text{N} \cdot \text{m}) = 2 \pi R T \dots \quad (3)$$

として表わされる。これに対して、仕事率 W_M はその仕事に要した時間で E を除し、単位時間当たりの搅拌エネルギー ($\text{N} \cdot \text{m}/\text{s}$) として与えられる。Fig. 2 に一例として $W_A=70\%$ における搅拌エネルギー $E(\text{N} \cdot \text{m})$ と混合度 α の関係を示す。この場合、搅拌回転数で比較すると、20 rpm のものがエネルギー的に有利である。低回転数域においてはエネルギー的には差がないが、達成される混合度 α に差がある。一方、高回転数域になると、エネルギーにかなり差があるが、混合度 α に差を生

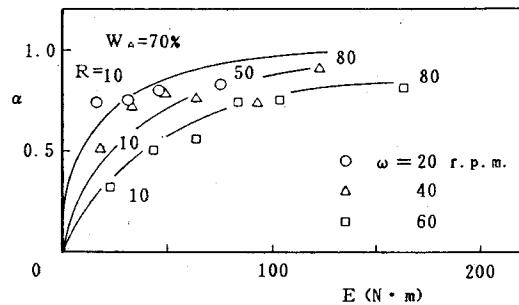


Fig. 2 Relations between degree of mixing α and mixing energy E .

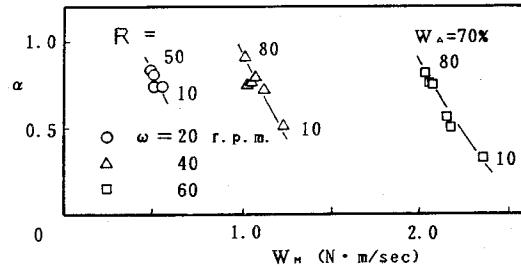


Fig. 3 Relations between degree of mixing α and mixing efficiency W_M .

じない。この現象は 70% 粘土において顕著であり、含水比が上がるほど回転速度による差は小さくなる。Fig. 3 に $W_A=70\%$ における仕事率 $W_M(\text{N} \cdot \text{m}/\text{s})$ と混合度 α の関係を示す。図より、回転速度が速いほど仕事率は大きいが、所定の R に対して達成される混合度 α は小さい。各回転速度に対して、搅拌回転数が小さいほど仕事率は大きく、両者の間に負の相関がみられることが判明した。したがって、本実験で採用した搅拌回転速度に関していえば、エネルギー的にみても 20 rpm の場合において最も搅拌に対する効率が良いことがわかった。実施工においては、省エネルギーのために施工時間は長くとも、エネルギー効率の高い搅拌回転速度として 20 rpm を評価する経済的立場を選択する場合もあり得る。

次にこの搅拌エネルギーを単位体積当たりで評価し、今回得られたデータに対して回帰分析を行った。なお、搅拌回転速度と搅拌トルクの間には相関性があると思われる所以、搅拌エネルギー $E_V(\text{kN} \cdot \text{m}/\text{m}^3)$ と混合度 α_E の単回帰分析を行っている。ここでは、一例として $W_A=70\%$, $\omega=20$ rpm について示す。

$$\alpha_E = 0.322 E_V^{0.0837} \dots \quad (4)$$

(相関係数 : 0.936)

3. 平面搅拌されたセメント混合土の強度・変形特性

(1) 実験条件

セメント混合土の強度・変形特性を調べるために一軸圧縮試験用の供試体は、2.(2)と同様にA材料としてセメント入りカオリン粘土(含水比 $W_A=70, 80, 100\%$)、B材料として $W_B=70\%$ のカオリン粘土を平面搅拌することにより作成した。さらに、搅拌混合されたA材料とB材料中に含まれる全湿潤カオリン粘土に対するセメント乾燥重量は、いずれも実施工における吐出量を考慮して、 300 kgf/m^3 (2.94 kN/m^3)とした。配合率に換算すると $a_w=18.8\%$ である。なお、A材料とB材料の混合体積比を $1:1$ となるように調整した。

(2) 実験方法

A材料とB材料を所定の条件に調整した後、混合度試験と同じ搅拌装置を用いて平面搅拌を行った。平面搅拌された部分から直接圧縮試験用供試体をサンプリングすることは困難であったので、搅拌終了後搅拌翼上部の未搅拌部の粘土を取り除き、搅拌混合された部分の粘土をブロック状に採取し、直径 50 mm 、高さ 100 mm のモールドに締固めや乱れが発生しないように細心の注意を払って層状に重ねて供試体を作成した。その後、供試体は 20°C の恒温室で7日間養生し、一軸圧縮試験を行った。

(3) 搅拌回転数と強度・変形特性

Fig. 4(a)に $W_A=70, 80, 100\%$ における搅拌翼の全回転数 R 回と一軸圧縮強度 $\sigma_t(\text{MPa})$ の関係を示す。図中の曲線は、単回帰分析により求めた $R \sim \sigma_t$ 曲線である。実測値を平均値で示している。重回帰分析の結果は以下のように得られた。

$$\sigma_t = 3.77 \cdot 10^3 W_A^{-2.46} R^{0.489} \quad (\text{MPa}) \quad \dots \dots \dots \quad (5)$$

(重相関係数: 0.923)

なお、上式は当該カオリン粘土と普通ポルトランドセメントの混合土に対してのみ成立することはいうまでもない。式(5)を決定するのに $70 \leq W_A(\%) \leq 100, 0 \leq R \leq 80$ のデータを使用している。なおここで、搅拌回転速度は $\omega=20 \text{ rpm}$ で一定であるためその影響は考慮しない。Fig. 4(a)および式(5)は W_A が小さいほど、また R が大きいほど、 σ_t が増加することを定量的に示している。

Fig. 4(b)に $W_A=70, 80, 100\%$ における搅拌翼の全回転数 R 回と変形係数 $E_{50}(\text{MPa})$ の関係を示す。図中の曲線、実測値についてはFig. 4(a)と同様の要領で決定した。 $R \sim E_{50}$ と同様の結論が導かれ、重回帰分析の結果は以下のように得られた。

$$E_{50} = 2.76 \cdot 10^6 W_A^{-2.97} R^{0.52} \quad (\text{MPa}) \quad \dots \dots \dots \quad (6)$$

(重相関係数: 0.980)

式(6)を決定したデータの範囲は、式(5)と同様である。

(4) 混合度と強度・変形特性

前述の検討により混合度 α は混合土の強度・変形特性を規定する総合的な指標であることが期待された。一例として $W_A=70\%$ における σ_t と所定の W_A, R, ω から式(2)によって算定した推定混合度 α との回帰分析の結果を以下に示す。

$$\sigma_t = 4.85 \alpha^{8.10} \quad (\text{MPa}) \quad \dots \dots \dots \quad (7)$$

(相関係数: 0.992)

同様に次式は、Fig. 4

(b)の結果をおのおの推定混合度 α との関係で整理したものである。

$$E_{50} = 7.57 \cdot 10^2 \alpha^{11.0} \quad (\text{MPa}) \quad \dots \dots \dots \quad (8)$$

(相関係数: 0.988)

もともと α は、固化材特性、土質特性、吐出方法等が同一であれば式(2)

にも明らかなように、 W_A, ω, R に強く依存するパラメータであるから、 α によって強度・変形特性がある程度総合的に把握できる可能性があることを示している。

(5) 搅拌エネルギーと強度・変形特性

Fig. 5(a)に $W_A=70, 80, 100\%$ における単位体積当たりの搅拌エネルギー $E_V(\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m}^3)$ と一軸圧縮強度 $\sigma_t(\text{MPa})$ の関係を示す。図中の曲線は、単回帰分析により求めた $E_V \sim \sigma_t$ 曲線である。なお、実測値を平均値で示している。回帰分析の結果は $0 \leq E_V(\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m}^3) \leq 1.80 \times 10^2$ のデータをもとに以下のように得られた。

$$\sigma_t = 3.05 \cdot 10^{-2} E_V^{0.687} \quad (\text{MPa}) \quad \dots \dots \dots \quad (9)$$

(相関係数: 0.830)

搅拌回転数 R 回の代わりに $E_V(\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m}^3)$ をパラメータとして用いても、強度特性をよく把握している。また E_V が大きいほど、 σ_t が増加することを定量的に示している。

Fig. 5(b)に $W_A=70, 80, 100\%$ における単位体積当たりの搅拌エネルギー $E_V(\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m}^3)$ と変形係数 $E_{50}(\text{MPa})$ の関係を示す。図中の曲線、実測値については、Fig. 5(a)と同様の要領で決定した。 $E_V \sim E_{50}$ と同様の結論が導かれ、重回帰分析の結果は以下のように得られた。

$$E_{50} = 1.65 E_V^{0.811} \quad (\text{MPa}) \quad \dots \dots \dots \quad (10)$$

(相関係数: 0.892)

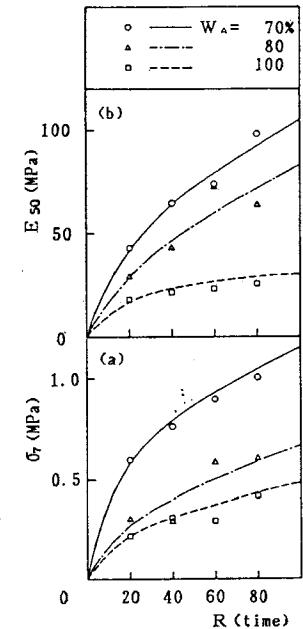


Fig. 4 Unconfined compressive strength σ_t , modulus of deformation E_{50} and total number of revolution R for various water contents W_A .

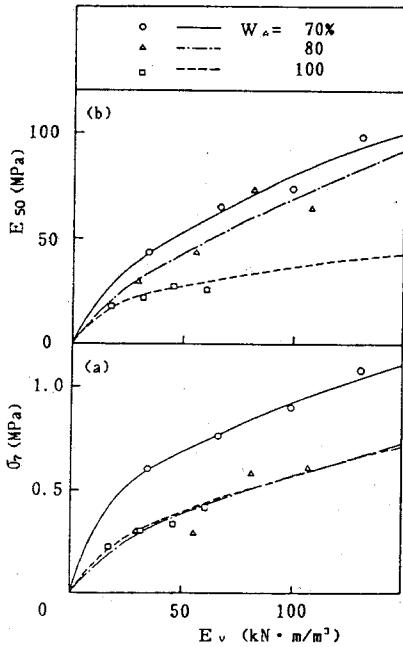


Fig. 5 Unconfined compressive strength σ_u , modulus of deformation E_{50} and mixing energy per unit volume E_V for various water content W_A .

式(10)を決定したデータの範囲は、式(9)と同様である。

以上 σ_u , E_{50} と E_V の間には高い相関性が確認されたから式(4)を考慮すれば、同様に σ_u , E_{50} と a_E に関する良好な相関性を予想し得る。以下に、 $W_A=70\%$ に対する結果のみを示す。

$$\sigma_u = 2.19 a_E^{5.10} \text{ (MPa)} \quad \dots\dots\dots (11)$$

(相関係数 : 0.994)

$$E_{50} = 2.56 \cdot 10^2 a_E^{6.90} \text{ (MPa)} \quad \dots\dots\dots (12)$$

(相関係数 : 0.987)

4. 室内モデル杭の強度・変形特性

現在、現場において打設されたセメント処理杭の強度は通常所定の養生期間経過後打設杭より直接サンプリングされた試料に対する一軸圧縮試験により求められている。しかし、実際問題としてはサンプリング時の乱れや応力解放などによる強度のばらつきを避けることができず、原位置で形成された安定処理杭の力学特性を正確に把握することは困難である。ただし、田中ら⁹⁾は、処理土を大きな柱体のまま引き上げ、足場で固定した後、試験のための丁寧なボーリングおよびサンプリングを行っている。これによると、通常のボーリングで得られるサンプルと比べて乱れは少ないと考えられる。

ここでは、立体搅拌実験を行い、実施工を模して、室内モデル杭を打設し、打設後7日間室温養生した後、で

きるだけ乱さないよう細心の注意を払って一軸圧縮試験を行った。その結果得られた室内モデル杭の強度・変形特性に及ぼす立体搅拌時の搅拌条件すなわちピッチ、搅拌回転速度および昇降回数の影響を求めた。また、打設時の搅拌翼に作用するトルク変動から求めた単位体積当たりの搅拌エネルギーと強度・変形特性との関係を明らかにした。

(1) 実験方法

Fig. 6 に立体搅拌実験装置を示す。0.75 kW 無段变速機付(20~120 rpm)モーターAは搅拌翼を回転させ、0.75 kW 無段变速機付モーターBはジャッキと連動して0.03~1.44 m/minで昇降台を上下させる。実施工においてはポンプ圧送によるものが多いが、ここでは決定された吐出量のセメントスラリーが、昇降台に連結された吐出シリンダーから強制吐出されるようになっている。セメントスラリーは、シリンダーからパイプを介して一軸一段二枚翼の両翼の長さ10 cm, 翼幅2 cm, すくい角π/4の搅拌翼の裏面に開けられた8つの穴から吐出される。搅拌容器は、内径157 mm, 高さ400 mmの塩化ビニール製のパイプに底板を付けたものを用いた。また、搅拌トルクを測定するために搅拌翼軸の上部に4枚の半導体ゲージを貼付している。改良地盤の試料として含水比70%のカオリン粘土を練り返したまま自重压密させることなく未压密状態で用いた。改良材は、普通ポルトランドセメントを実施工における実績値を考慮して、水セメント比1.0、吐出量300 kgf/m³(2.94 kN/m³)とした。なお、配合率に換算すると $a_w = 18.8\%$ である。本研究では、室内モデル杭の強度・変形特性に影響する要因として、搅拌回転速度、昇降速度、ピッチおよび昇降回数に着目した。

実験手順は、試料入りの搅拌容器を昇降装置に固定し

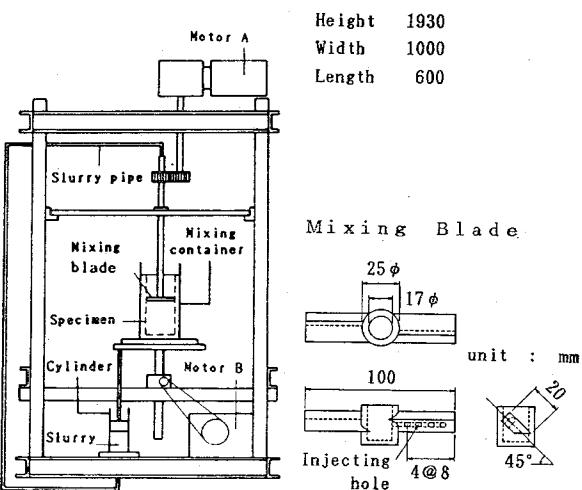


Fig. 6 Apparatus for three-dimensional mixing simulating the in-situ mixing condition.

搅拌翼を所定の搅拌回転速度で回転させながら、所定の昇降速度で昇降台を上昇させる。また、混合トルクをこの貫入時に測定する。次にその位置で昇降台と吐出シリンダーを連結させ、搅拌翼を回転させながら昇降台を下降させ、引き抜き時吐出を行う。ここで、繰り返し昇降搅拌を行う場合には、昇降台と吐出シリンダーの連結を解き、搅拌混合を行う。打設後7日間室温養生し、一軸圧縮試験を行う。

(2) ピッチと強度・変形特性

搅拌回転速度を ω (rpm) 昇降速度を V (cm/min) とするとピッチ P (cm/rev.) は、

$$P = V/\omega \quad \dots \dots \dots (13)$$

示される。 $P=0.05, 0.10, 0.20, 0.33, 0.50, 1.00$ (cm/rev.)において種々の搅拌回転速度で実験を行ったが、同一ピッチであれば搅拌回転速度と一軸圧縮強度にはあまり有意な関係が認められなかった。このことは、ピッチの小さい場合の平面搅拌状態を除けば搅拌翼の通過する軌跡がらせんとなり、改良柱体の構造が強度を大きく支配するためである。そこで、種々の搅拌回転速度に対してピッチと一軸圧縮強度との関係を整理した。Fig. 7(a) に、ピッチ P (cm/rev.) と7日間養生後の試料に対する一軸圧縮強度 σ_7 (MPa) の関係を示す。図中には実測値を平均値と標準偏差で示している。なお、正転、逆転を交互に組み合わせた昇降回数6回のデータも併せて示している。

$P=0.33$ (cm/rev.) を極小値としてその前後で若干強度が増加しており、極小値付近が最もデータのはらつきが小さい。ピッチが 0.33 より大きくなると強度が若干大きくなるものの、杭の施工状態が不均一で信頼性が乏しい。単位長さ当たりの吐出量は本実験の場合、強制吐出であるので同一である。しかし Photo 1 に示すように、ピッチが大きいと搅拌が不十分な部分ができ、セメントの混合量が少ない部分と多い部分を示すらせん構造ができる。そのいずれかの部分の強度特性に左右されるため、一軸圧縮強度がばらついていると思われる。またピッチが 0.33 より小さくなるとばらつくものの強度は増加している。

実施工では、 $P=1.00$ (cm/rev.) 程度が一般的である。実機の搅拌翼の全長が 1m 程度であり、寸法効果を考慮すると本実験では搅拌翼の全長が 10cm であるので、 $P=0.10$ (cm/rev.) が実施工における $P=1.00$ (cm/rev.) に相当すると思われる。この $P=0.10$ (cm/rev.) の値に注目すると、強度は増加しており、実施工の妥当性を示すとともに、この程度の搅拌混合が必要であることを示している。

今回の実験結果からピッチの減少が、強度の増加に効果的であることが明らかになった。

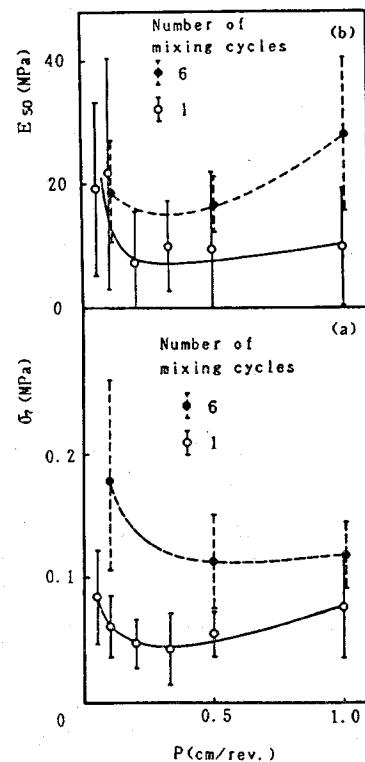


Fig. 7 Relation between unconfined compressive strength σ_7 , modulus of deformation E_{60} and vertical rotational pitch P .

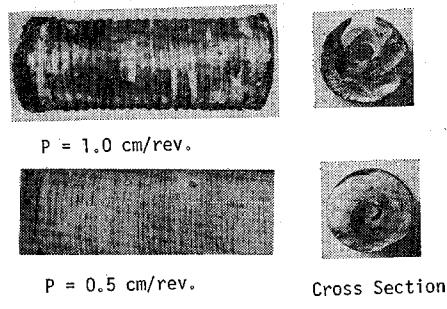


Photo 1 Structure of cement treated pile for two pitches (after curing).

Fig. 7(b) に、ピッチ P (cm/rev.) と変形係数 E_{60} (MPa) の関係を示す。図中には実測値を平均値と標準偏差で示している。 σ_7 と比してデータがかなりばらついているが $P \sim \sigma_7$ 関係と同様な結論が導かれる。

(3) ピッチと搅拌エネルギーの関係

単位体積当たりの搅拌エネルギーを求め、投入エネルギー量と強度・変形特性との関係を明らかにするために、搅拌回転速度 $\omega=30, 60, 90$ rpm で搅拌トルクを測定した。その結果、搅拌トルクと回転数の関係についてはいずれの搅拌回転速度においてもピッチが小さいほど同一回転数に対する搅拌トルクは小さく、ピッチが大き

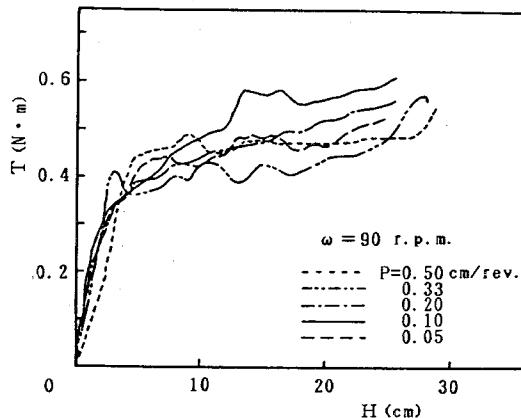


Fig. 8 Relation between mixing torque T and depth H for various pitches.

いほど搅拌トルクは低回転数で急激に増加する傾向がみられた。また、深さ方向の搅拌トルクの変動をみると、Fig. 8 に示したように、搅拌回転速度 90 rpm においてはピッチと搅拌トルクの間には顕著な傾向は認められなかった。

Fig. 9 にピッチ P (cm/rev.) と単位体積当たりの搅拌エネルギー E_V (kN·m/m³) の関係を示す。ここで、改良体積は $1.86 \cdot 10^{-3} \leq V(\text{m}^3) \leq 2.71 \cdot 10^{-3}$ の範囲で変動している。図中に、実測値の平均値のみを示している。図より、同一ピッチであれば搅拌回転速度と昇降速度の組合せによらず、 E_V がほぼ同じ値を示すことがわかる。また、ピッチと単位体積当たりの搅拌エネルギーはかなり高い相関性を示している。今回得られたデータに対する回帰分析結果を以下に示す。

$$E_V(\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m}^3) = -10.7 + 37.6/P(\text{cm}/\text{rev.}) \quad \dots(14)$$

(相関係数 : 0.988)

式 (14) を決定するのに、 $0.05 \leq P(\text{cm}/\text{rev.}) \leq 1.00$,

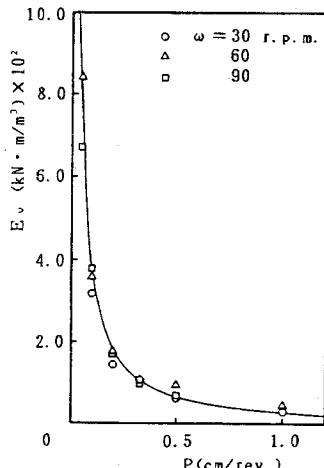


Fig. 9 Relation between mixing energy per unit volume E_V and pitch P .

$39.4 \leq E_V(\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m}^3) \leq 840.5$ のデータを使用している。

(4) 搅拌エネルギーと強度・変形特性

6 行程 (搅拌翼の貫入・引抜きの 1 サイクルを 1 行程とする。この場合、最初の 1 行程中引抜き時のセメントスラリーの吐出を行っている) 打設のデータを含む単位体積当たりの搅拌エネルギー $E_V(\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m}^3)$ と一軸圧縮強度 σ_s (MPa) の関係を回帰分析した結果を以下に示す。

$$\sigma_s = 1.14 \times 10^{-2} E_V^{0.296} \dots(15)$$

(相関係数 : 0.720)

次に、6 行程打設のデータを含む単位体積当たりの搅拌エネルギー $E_V(\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m}^3)$ と変形係数 E_{50} (MPa) の関係を回帰分析した結果を以下に示す。

$$E_{50} = 2.65 E_V^{0.254} \dots(16)$$

(相関係数 : 0.639)

今まで実施工においては、力学特性を施工条件 (ピッチ) により評価しており、ピッチを小さくすれば改良効果が上がることは明らかであった。しかし、ピッチを小さくすれば施工能率が大幅に下がる。そのため、どの程度までピッチを下げれば最適かという議論が起こるが、ホバート型ソイルミキサーで完全混合したときの当該一軸圧縮強度 0.654 MPa の 50% の強度を期待すると、式 (15) より $E_V = 8.23 \times 10^4 \text{ kN}\cdot\text{m}/\text{m}^3$ の搅拌エネルギーが必要であり、式 (14) より $P = 0.05 \text{ cm}/\text{rev.}$ と設定しても約 55 行程の混合を必要とする。そのため搅拌効率を向上させる必要があり、搅拌翼の枚数や段数の増加および正逆転の組合せを検討しなければならない。

ここで平面搅拌実験において提唱した混合度の適用について考える。立体搅拌においてピッチをある程度以下に小さくすれば、一段二枚羽根で搅拌翼の条件が同じであるので、平面搅拌と同様な搅拌条件が得られると考えられ、搅拌エネルギーあるいは混合度による評価によって相互の力学特性を比較できるはずである。しかし、この場合、セメントの初期設定や吐出方法などの境界条件が異なるため直接比較することは困難である。両者を一致させれば、平面搅拌と立体搅拌の実験結果を統一的に評価できるであろう。混合度により統一的に評価していくには今後の研究の余地が残されている。なお、この際の混合度の施工管理への応用に当たっては、カルシウム含有量で評価した方がより的確な品質管理を行うことができよう。

5. まとめ

本研究では、カオリン粘土を使用したセメント処理土の搅拌条件を考慮してその強度・変形特性を明らかにした。まず、混合状態を混合度により評価し、種々の搅拌

条件下で平面搅拌実験を行った。ここで、混合度に影響を与える要因を明らかにし、混合度による強度・変形特性の評価を試みた。次に実施工を模した立体搅拌実験において種々の搅拌条件の室内モデル杭の強度・変形特性に及ぼす影響を明らかにした。以下に得られた主要な結論を列挙する。

(1) 水素ガス測定法による混合度 α と粘土の含水比 W_A 、搅拌回転速度 ω 、搅拌回転数 R の関係は重回帰分析によると式(2)のように得られ、高い相関性を示した。

(2) 混合度 α と単位体積当たりの搅拌エネルギー E_V の関係は式(4)に示すように高い相関性を示し、 E_V も混合状態を規定する重要な要因であることが明らかになった。

(3) 平面搅拌された混合土に対する一軸圧縮試験により、セメント混合土の一軸圧縮強度 σ_t 、変形係数 E_{50} と含水比 W_A 、搅拌回転数 R との関係、および σ_t 、 E_{50} と推定混合度 α の関係を式(5)、(6)、(7) および(8)によって定量的に明らかにした。また、 σ_t 、 E_{50} は、式(9)、(10)により搅拌エネルギー E_V を用いて精度良く表現されることが明らかになった。

(4) 実施工を模した立体搅拌により作成された供試体に対する一軸圧縮試験より、ピッチと強度との関係を調べた結果、ピッチが 0.33(cm/rev.) 付近に極小値があり、ピッチをこれ以上小さくすることにより強度特性の改善をはかることが明らかになった。変形特性に関しても同様な傾向がみられた。また、搅拌のための昇降回数の増加も強度・変形特性の改善に効果のあることがわかった。

(5) 立体搅拌試料に対するピッチ P と単位体積当たりの搅拌エネルギー E_V との間には高い相関性があり、回帰分析の結果、式(14)の関係が得られた。この E_V と一軸圧縮強度 σ_t 、変形係数 E_{50} との関係を回帰分析し、式(15)、(16)の関係を得、 E_V を増大させると σ_t 、 E_{50} が増大することが定量的に明らかになった。

以上、一軸一段二枚翼についての基礎実験を行ったが、今後、 E_V を増大させるためには、多軸多段複数翼とし、また翼形状を工夫する必要がある。たとえば水平および鉛直方向の搅拌効果を増大させるため、交番せん断力を作用させるための最適な搅拌翼形状について設計する必要がある。また、腐植を含む地盤材料に対しては

E_V だけではなくセメントの強度発現の低減率をも考えていくべきである。さらに、実施工で要求されるのは施工中の混合度の低下による強度のばらつきを把握し、かつ施工中にそのばらつきを減少させるための管理手法であり、単位体積当たりの搅拌エネルギーが安定供給されるように、搅拌軸に作用するトルクおよび回転数の異常な変動に対してセメントスラリーの吐出量をコントロールするなど即刻対応できる管理システムを構築する方法について今後検討していくべきである。

謝 詞：本論文を作成するに当たり、有益なご助言を頂いた本学 横 明潔助教授、実験およびデータ解析にご協力頂いた河原莊一郎助手、元学生 松本吉記氏および学生 小野達史、松本明彦両氏に多大なる援助を得たことを記して、厚く謝意を表する。

参考文献

- 1) Kawasaki, T., Niina, A., Saito, S., Suzuki, Y. and Honjo, Y.: Deep mixing method using cement hardening agent, Proc. of the 10th ICSMFE, Vol. 3, pp. 721~724, Jun., 1981.
- 2) Terashi, M. and Tanaka, H.: Ground improved by deep mixing method, Proc. of the 10th ICSMFE, Vol. 3, pp. 721~724, Jun., 1981.
- 3) Honjo, Y.: A probabilistic approach to evaluate shear strength of heterogeneous stabilized ground by deep mixing method, Soils and Foundations, Vol. 22, No. 1, pp. 23~38, Mar., 1982.
- 4) 畠昭治郎・檜垣義雄・青井 実・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、第382号/III-7, pp. 35~43, 1987年6月。
- 5) 室 達朗・横 明潔：セメント混合粘性土の施工と強度について、愛媛大学工学部紀要、第10巻、第1号、pp. 271~280, 1982年2月。
- 6) 室 達朗・横 明潔・河原莊一郎：セメント処理土の混合度と強度の関係、愛媛大学工学部紀要、第10巻、第4号、pp. 407~417, 1985年2月。
- 7) 土質工学会：土質工学会基準案「締固めを伴わない安定処理土の試験方法」(JSF 規格: T 31-81 T), 土と基礎、Vol. 30, No. 1, pp. 95~97, 1982年1月。
- 8) 室 達朗・深川良一・向畑和男：セメント処理土の変形・強度特性に及ぼす搅拌条件の影響、愛媛大学工学部紀要、第11巻、第2号、pp. 393~403, 1987年2月。
- 9) 田中洋行・寺師昌明：深層混合処理工法による現場処理土の工学的特性、港湾技術研究所報告、第25巻、第2号、pp. 89~119, 1986年2月。

(1987.3.14・受付)