

深層混合処理工法について（その7）

——四軸モデル混合実験——

西林 清 茂 松 尾 龍 之
細 谷 芳 己 梅 津 喜 美 夫

Improvement of Deep Soft Ground by Cement Mixing (Part 7)

——Mixing Tests of a Four-Shaft Mixer Model——

Kiyoshige Nishibayashi Tatsuyuki Matsuo
Yoshimi Hosoya Kimio Umetsu

Abstract

The use of an effective mixer is vital for improvement of the quality of soil in deep soft ground through stabilization by mixing with cement. In the past, the authors worked on development of a single-shaft mixer with which is ordinarily most difficult for stabilizer and cohesive soil to be mixed together, but an effective oval-shaped mixer was developed and good effects were obtained using it for improvement works on land.

This time, the authors have made a four-shaft mixer on a trial basis to widen the scope of application to soft ground under the sea, studying multiple-shaft mixer configurations, comparing various mixing conditions, and the differences in consolidation effects between single- and multiple-shaft mixers.

概 要

深層混合処理工法による改良固結体の品質向上は、混合性能に優れた攪拌装置の使用が不可欠である。現在まで、固化材と軟弱粘性土の攪拌混合が最も難しい一軸攪拌装置について開発研究を進め、改良効果の大きいだ円形攪拌翼を生み出し、主に陸上の地盤改良工事に適用し好結果を得てきた。

今回、海底軟弱地盤改良工事への適用拡大を目的として、このだ円形攪拌翼の特徴を生かした四軸攪拌翼モデルを試作し、多軸攪拌翼形状の検討、各種攪拌条件と改良効果の比較、単軸と多軸の改良効果の相違などについて実験的に比較検討した。

1. まえがき

深層攪拌混合処理 Oval-DM 工法における攪拌装置の研究は、これまで主に、攪拌翼と対象土の共回り現象などの影響で混合が困難と言われている一軸攪拌装置について、基礎的なモデル試験^{1),2)}、大型のフィールド試験³⁾、実大規模の現場試験⁴⁾を積み重ね、混合性能に優れた Oval 型攪拌装置を開発した。現在までの当工法の適用例は、陸上軟弱地盤における盛土時のすべり防止、掘削時の土留、擁壁基礎地盤の強化など、多くの実績を上げ、満足する好結果を得てきた。

今回、この攪拌装置の適用拡大を計り、海底軟弱地盤改良を目的として、だ円形攪拌翼の特徴を生かした四軸モデル攪拌装置を試作し、攪拌翼形状、対象地盤強度、攪拌軸回転数を実験要因とした混合性の比較、同一攪拌

翼形状モデルによる単軸と多軸の改良効果、などの基礎的なモデル実験を実施した。

2. 海上施工用攪拌装置の現況

陸上の処理工事では、一般に固化材と改良対象土の混合性を考慮し、攪拌径 0.8~1.0 m×1~2 軸の攪拌装置の使用が多い。一方、海上の処理工事では、改良面積が陸上に比べて広い、作業船の移動と位置決めに時間を要する、などの理由から攪拌径が 1.0~1.5 m の攪拌翼を四軸か八軸で連動させ、一回の昇降作業で 5~6 m² の面積を攪拌混合し、さらに改良深さも 50~60 m におよぶ大型攪拌装置が主流である。

また、固化材であるセメントミルクの注入方法は、中空攪拌軸から吐出する方法、攪拌軸とは別に注入管を設けて吐出する方法、また、注入時期に関しては、攪拌軸

買入時に行なう方法、引抜き時に行なう方法、などがあり、規格化されたものはない。

3. モデル実験概要

3.1. 実験用モデル攪拌機

実験に使用したモデル攪拌機は、図一に示す四軸攪拌方式の機械である。固化材のセメントミルクは、4本の中空攪拌軸から注入され、また、攪拌軸の先端部に直径 $\phi=240$ mm の各種形状の攪拌翼を装着する機構になっている。

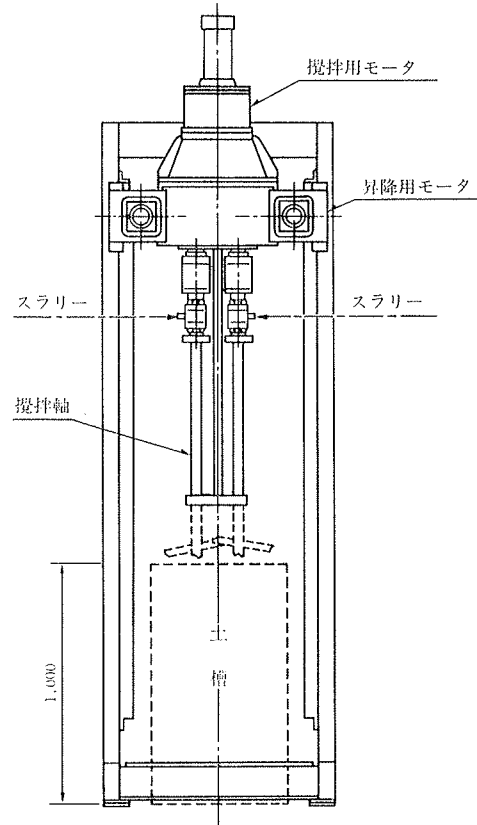
攪拌機、注入ポンプの主要諸元を、表一に示す。

3.2. 試験用地盤

試験地盤は、東京港大井付近で採取した海底粘性土を直径 $\phi=60$ cm×深さ $L=100$ cm の鋼製土槽に投入したものであるが、これまでの一軸攪拌翼モデル実験と同様、種々の地盤強度を得るために、土槽投入前に粘性土を大型ミキサーで攪拌し、含水比調整した後、所定量のセメントを加えて地盤を作成した。

地盤の強度は、 $q_u=0.3\sim 0.4$ kgf/cm² の軟弱地盤としては比較的軟らかい地盤と、 $q_u=0.6\sim 0.7$ kgf/cm² の比較的硬い地盤の2種類を中心に実験を行なったが、地盤強度の改良効果に与える影響を調べた実験ケースでは、強度を $q_u=0.1\sim 0.7$ kgf/cm² まで変化させた。

表一は、実験に用いた粘性土の土質試験結果であるが、砂分22%、シルト・粘土分78%の粒度分布を示して



図一 四軸モデル攪拌機

攪拌機	回転数	0~60rpm
	トルク	max 70kgf-m
	攪拌動力	3.7kw
	昇降速度	0.14~1.4m/min
昇降ストローク		max 2m
	型式	油圧ピストン2連×2台
注入ポンプ	吐出量	0.4~10ℓ/min
	吐出圧	max 15kgf/cm ²
	所要動力	3.7kw

表一 攪拌機の主要諸元

土質試験項目		試験値
比重 Gs		2.698
粒度組成	レキ分(%)	0
	砂分(%)	22
	シルト分(%)	36
	粘土分(%)	42
コンシス	液性限界(%)	38.7
	塑性限界(%)	20.9
	塑性指数	17.8
	含水比w(%)	65
有機物含有量(%)		5.985
PH		7.8

表二 試験用地盤の土性

いる。

3.3. 実験方法

実験は、攪拌軸下降時に4本の各軸から所定のセメントミルクを注入しながら回転、貫入し、上昇時には、注入を停止して攪拌混合する貫入時注入方式で行なった。

実験した各種攪拌混合条件は、実機の施工仕様を勘案し、表一3のようにした。すなわち、攪拌軸の回転数、昇降速度を実機とほとんど等しくして、攪拌翼の地盤に対する羽根切り回数を同程度にした。

改良効果に影響を与える攪拌混合要因としては、この羽根切り回数に加え、攪拌翼の周速も考えられるが、今回のモデル実験では、使用した攪拌機的能力から周速は考慮しなかった。

貫入深さは、90 cm であるが、セメントミルクの吐出口の位置関係から、攪拌混合範囲は、図二に示すよう

項目		仕様	
攪拌条件	回転数	貫入時 Nd(rpm)	31,40
		引抜き時 Nu(rpm)	45,60
	昇降速度	貫入時 Vd(m/min)	0.5
		引抜き時 Vu(m/min)	1.0
注入条件	固化材の種類		普通ポルトランドセメント
	配合 W/C		0.8
	添加率(%)		18
	セメント添加量(kg/m ³)		160

表一3 攪拌混合実験条件

に長尺攪拌軸で深さ 83 cm, 短尺攪拌軸で深さ 80 cm である。

ただし, 三段の攪拌羽根が完全に通過する部分は, 上方 52 cm までで, その下の攪拌部は, 一段か二段の攪拌羽根のみの混合になる。

3.4. 改良効果の調査, 試験方法

改良効果の判定は, 原則として固結土の一軸圧縮強度による。

固結土の一軸圧縮試験は, 攪拌混合直後に図-3 に示す位置に直径 $\phi=75$ mm \times 長さ $l=1,000$ mm のシンウォールチューブを打ち込み, 翌日これを引抜いて供試体をサンプリングし, 標準養生した後, 材令 7 日, 28 日で行なった。

また, 固結土の強度試験の他に, 平面的な改良効果を調べるため, 代表的な実験ケースについて固結体断面のカルシウム分析を行なった。

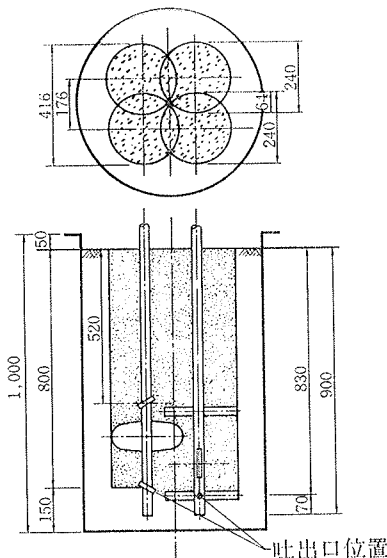


図-2 攪拌混合範囲

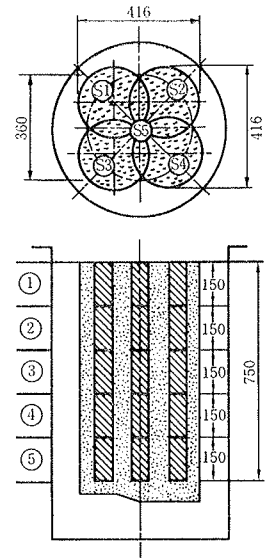


図-3 固結土採取位置

4. 実験結果および考察

4.1. 攪拌翼形状と改良強度

実験に使用した攪拌翼モデルは, 図-4 に示す 4 種類である。

すなわち, 従来の海上用攪拌装置を模して作った水平三段 6 枚羽根の H 型を基本に, 水平三段の中段羽根のかわりにだ円羽根を付けた O-I 型, この中段だ円羽根に 30 度のひねりを加えた O-II 型, また水平三段の上段羽根のかわりにだ円羽根を付けた O-III 型の 4 型式の改良効果を比較, 検討した。

地盤強度が $q_u=0.3\sim 0.4$ kgf/cm² の試験用地盤で改良強度を比較した結果を図-5 に示す。

材令 7 日の改良強度は, 4 型式の攪拌モデルとも顕著な差がなく, $q_u=5$ kgf/cm² 前後に分布している。一方, 材令 28 日強度は, 4 型式とも $q_u=10$ kgf/cm² 前後の値が得られているものの, 若干の差が認められ, O-I 型,

O-III 型の攪拌翼モデルの方が, 他の二つのモデルに比べて, やや大き目の値を示している。

次に, 地盤強度が $q_u=0.6\sim 0.7$ kgf/cm² の比較的硬い試験地盤で, H 型と O-I 型の 2 種類の攪拌翼モデルで比較した結果を図-6 に示す。

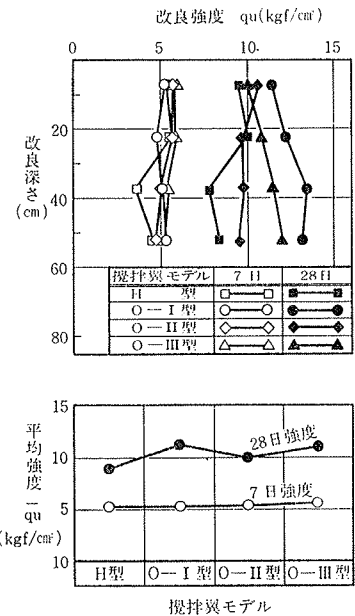


図-5 攪拌翼形状と改良強度 (初期地盤改良 $q_u=0.3\sim 0.4$ kgf/cm²)

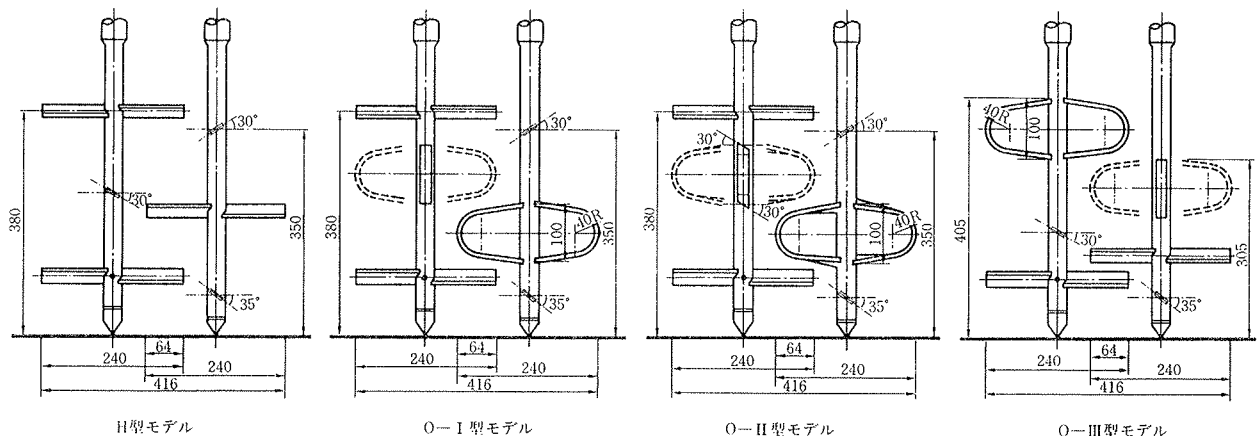


図-4 実験に使用した各種形状の攪拌翼モデル

材令7日強度は、この場合も両攪拌翼モデルに差がなく、 $q_u=5\sim6\text{ kgf/cm}^2$ であるが、28日強度になると、O-I型モデルの方が大きな改良強度を示している。

以上の2種類の試験地盤における攪拌翼モデルの比較から、強度が $q_u=0.3\sim0.4\text{ kgf/cm}^2$ の比較的軟らかい地盤に対しては、4型式の攪拌翼モデルの混合性にそれほど差がなかったが、地盤強度が $q_u=0.6\sim0.7\text{ kgf/cm}^2$ と大きくなると明らかにO-I型モデルが大きな改良強度を得た。これは、だ円翼の特徴である地盤を水平、斜め、垂直方向と立体的に細片化し、セメントミルクとの混合を容易にするという効果が、地盤強度が大きくなると、より効果的にあらわれたものと推察される。

4.2. 試験地盤強度と改良強度

O-I型攪拌翼モデルについて、改良前の試験地盤強度と改良強度の関係を求めたのが図-7である。実験は、初期強度 $q_u=0.1\text{ kgf/cm}^2, 0.3\text{ kgf/cm}^2, 0.5\text{ kgf/cm}^2, 0.7\text{ kgf/cm}^2$ の4種類の地盤で行なった。

同図より、それぞれの地盤の改良強度は、ほとんど明確な差がなく、7日強度は $q_u=5\sim6\text{ kgf/cm}^2$ 、28日強度は、改良範囲の下部で一部小さな値があるが、概略 $q_u=12\sim13\text{ kgf/cm}^2$ に分布している。

この結果は、この実験で採用した試験地盤の作成方法が改良強度に影響を及ぼしていないことと、初期強度の少々相違は、地盤が攪拌翼によって良く攪拌されるため、地盤の含水比、粒度分布、有機物含有量、PH、などの土質条件に比べると、改良強度への影響は極めて少ないことを意味している。

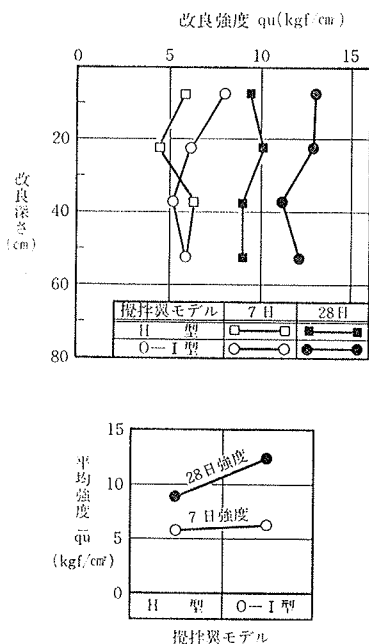


図-6 攪拌翼形状と改良強度 (初期地盤強度 $q_u=0.6\sim0.7\text{ kgf/cm}^2$)

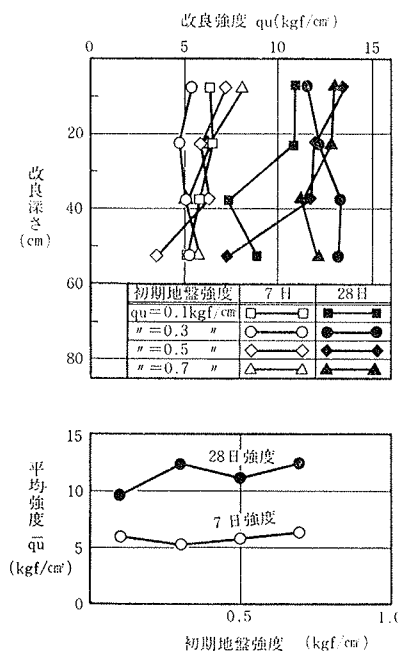


図-7 初期地盤強度と改良強度

4.3. 攪拌軸回転数と改良強度

O-I型攪拌翼モデルで、貫入時、引抜き時の攪拌軸回転数を次の2ケースに変化させた時の改良強度を比較したのが、図-8である。

- Case 1 { 貫入時回転数 $N_d=31\text{ rpm}$
引抜き時回転数 $N_u=45\text{ rpm}$
- Case 2 { 貫入時回転数 $N_d=40\text{ rpm}$
引抜き時回転数 $N_u=60\text{ rpm}$

Case 2の回転数は、Case 1に比べて約3割高いが、回転数の増加とともに、攪拌翼の地盤に対する羽根切り回数が多くなるため、当然改良強度は、7日、28日とも大きくなっている。

上述したように、今回の実験では、攪拌翼の周速を考慮していないが、今、仮に実機の攪拌翼径を $D=1.5\text{ m}$ 、攪拌軸回転数を $N=45\text{ rpm}$ とすると、攪拌翼外周部の周速 v は、

$$v = \frac{N\pi D}{60} = 3.22\text{ m/sec} \quad \dots\dots\dots(1)$$

一方、今回の直径 $\phi=240\text{ mm}$ の攪拌翼モデルで同等の周速を得るための回転数は、

$$N = \frac{60v}{\pi D} = 256\text{ rpm} \quad \dots\dots\dots(2)$$

となり、この回転数で攪拌混合すれば、改良効果はさらに優れたものになることが予想される。

4.4. 多軸の効果について

O-I型攪拌翼モデルについて、全く同一形状で直径を $D=500\text{ mm}$ に拡大した一軸攪拌装置を試作し、一軸と

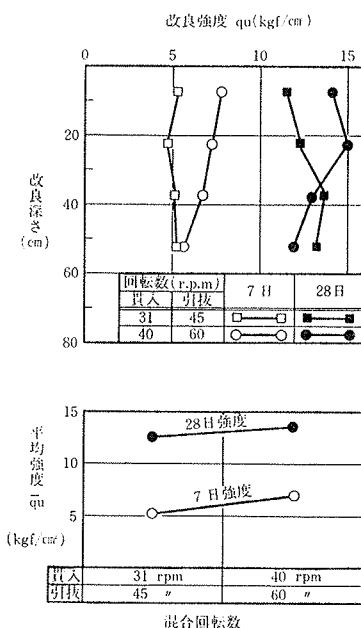


図-8 攪拌軸回転数と改良強度

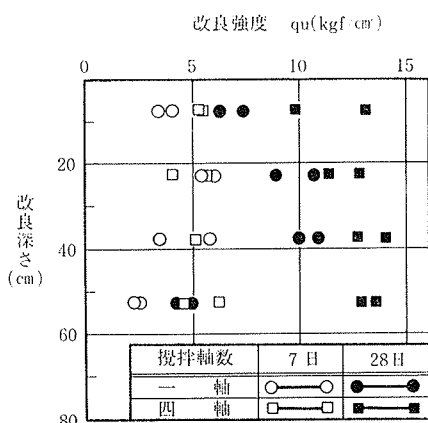


図-9 一軸，四軸モデル改良強度比較

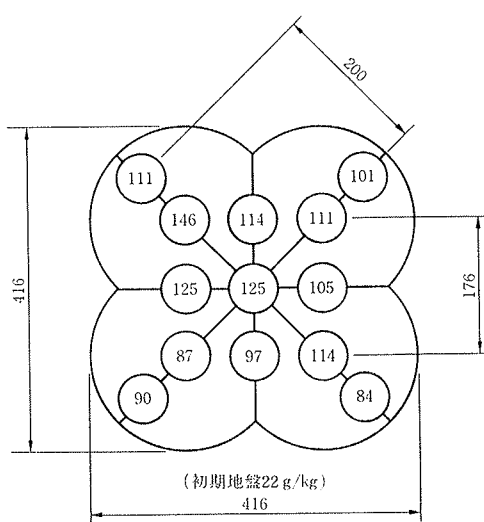


図-10 カルシウム含有量 (g/kg)

四軸の改良効果を比較した。

その結果を、図-9に示している。四軸モデルの方が改良強度も大きく、また強度のバラツキも少ない良好な改良効果を示している。

これは、単軸に比べて多軸で攪拌混合した場合、互いに隣り合った攪拌翼が反対方向に回転しているため、対象土がラップ部でぶつかり合う相乗効果があらわれ、混合に好結果をもたらしたものと思われる。

4.5. セメントの平面分布

O-I 攪拌翼モデルで造成した固結体の 30cm 深さ断面におけるセメントの含有量分布を調べたのが、図-10である。図の数値は、カルシウムの含有量で示している。

同図より固結体中心部の含有量は 125 g/kg、中間部で 100~110 g/kg、外周部で 90~110 g/kg の値を示しており、若干中心部が多いものの、全体の変動係数が $V=12.6\%$ と小さく、平面的にも均一性に優れた固結体であることが確認された。

また、カルシウム含有量の平均値 108.5 g/kg からセメント添加量を算定すると約 161 kg/m^3 となり、計画添



写真-1 掘り出した固結体

加量 160 kg/m^3 とよい対応を示している。

5. 固結体の外観調査

攪拌混合した後、約 1 週間経過した時点で土槽から固結体を取り出し、固結体寸法、表面の混合状況などの外観調査を行なった。その結果、すべての実験ケースで造成した固結体は写真-1に見られるように攪拌翼の軌跡通りにできており、表面の混合状況から各ケースの改良効果を比較することは困難であった。

6. あとがき

以上のモデル実験から、試作した O 型攪拌翼モデルは従来の攪拌翼を模して作った H 型に比べて同等か、地盤強度が大きい場合は、むしろより良い混合効果があることが確認された。

実験に用いた攪拌翼モデルは、実機の攪拌翼に比べて非常に小さいものであるため、今後、実物大モデルで海上実験を行ない、さらに開発を進めてゆく所存である。

最後に、本開発研究の実施に関して、東亜建設工業(株)から四軸モデル攪拌機をお借りし、同社 技術開発部、船舶機械部の関係各位から適切な指導と協力を戴いたことを付記し、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 斎藤，西林，松尾：深層混合処理工法について（その1），大林組技術研究所報，No. 21，（1980），pp. 95~99
- 2) 斎藤，西林，松尾：深層混合処理工法について（その2），大林組技術研究所報，No. 22，（1981），pp. 110~114
- 3) 斎藤，西林，松尾，細谷：深層混合処理工法について（その3），大林組技術研究所報，No. 23，（1981），pp. 87~91
- 4) 西林，松尾，細谷，須藤：深層混合処理工法について（その4），大林組技術研究所報，No. 25，（1982），pp. 85~89