

深層混合処理工法について (その4)

西林清茂 松尾龍之
細谷芳己 須藤賢

Improvement of Deep Soft Ground by Cement Mixing (Part 4)

Kiyoshige Nishibayashi Tatsuyuki Matsuo
Yoshimi Hosoya Ken Sudo

Abstract

The development of a mixing apparatus which would be decisive in improvement of deep soft ground has been going on since 1977. A prototype for this apparatus was produced through model experiments in the laboratory and the practicality was confirmed in field experiments of full-size apparatus. Based on the results, the authors carried out field experiments of actual scale, mixing 15 piles of $\phi 1$ m (diameter) $\times 10$ m (depth) under various conditions in natural cohesive ground using three types of mixing apparatus made on a trial basis.

This report describes the outlines of the field experiments and the results. The shapes and qualities of piles obtained were good and the efficiency of the "Oval" type mixing stabilizer developed was confirmed.

概要

深層混合処理工法における改良効果の決め手となる攪拌混合装置の開発を昭和52年以来進めている。これまでに室内モデル実験でその装置の原形を生み出し、またフィールド実験で実大規模装置の有用性を確認している。この成果を踏まえて、今回実際工事を想定した3種類の攪拌混合装置を製作し、粘性土からなる自然地盤を対象に、施工条件を各種変化させ、直径1m・深さ10mの固結パイルを合計15本造成する現場試験を実施した。

本報告は、この現場試験の概要とその試験結果について述べたものである。造成パイルの形状およびパイルの品質について好結果を得ることができ、これまで開発してきた“だ円型攪拌混合装置”の有用性を再確認した。

1. まえがき

深層混合処理工法における機械攪拌混合装置の開発を目的として、①固化材の均等供給方法、②混合性能大の攪拌羽根形状の2点に焦点を絞って研究を進めてきた。その開発経緯は、所報 No. 21¹⁾、No. 22²⁾、No. 23³⁾ に報告した通りであるが、室内モデル実験やフィールド実験の結果から、水平ブレードの注入補助羽根とだ円形攪拌羽根を組み合わせた“だ円型 (Oval 型) 攪拌混合装置” (以後、この装置を用いる深層混合工法を Oval-D・M 工法と呼ぶ) が実大規模 (直径 0.5~1 m) のパイル造成、改良効果に対し、非常に優れた攪拌混合装置であることが確認された。

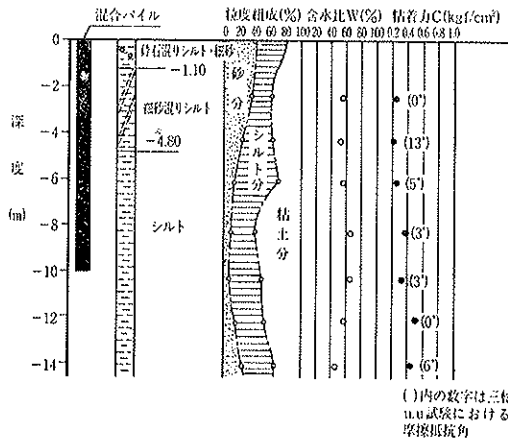
今回、これらの成果を背景に、自然地盤を対象として

実際工事を想定した3種類の攪拌混合装置を製作し、直径1m、深さ10mのパイル造成現場試験を行なった。

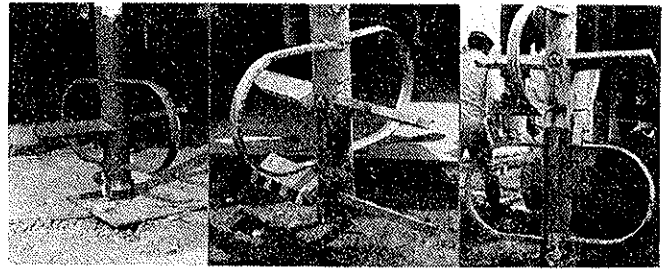
以下、施工条件を種々変化させて固結パイル15本を造成した現場試験の概要と結果について述べる。

2. 改良対象地盤

対象地盤は、埼玉県内の荒川河川敷に堆積する沖積粘性土軟弱地盤で、その主な土質性状は図-1に示す通りである。地層は、表層下約5mまでは細砂混りシルト層、その下はシルト・粘土分が90%以上を占めるシルト層から構成されており、いずれの層も標準貫入試験値で $N=0\sim 1$ 、粘着力で $C=0.2\sim 0.4$ kgf/cm² と軟弱である。



図一 対象地盤の土質性状



写真一 攪拌装置

3. 実験概要

3.1. 造成パイルの試験条件と配置

改良効果に影響を与える施工条件として、攪拌混合装置の型式、固化材添加率 α 、注入圧P、固化材注入時の攪拌軸上昇速度 v を種々変化させて、合計15本の固結パイルを造成した。その内の3本は、ラップパイルとして固結パイルの連続性調査、また1本は実物大の強度試験用パイルである。

造成した固結パイルの配置および各パイルの施工条件を図一2に示す。P-5, 6, 7はラップ幅20cmの連続パイル、P-15は実物大試験用のパイルである。

3.2. 攪拌混合方式

固化材と対象土の攪拌混合方式は、攪拌軸下降時に地盤の掘削と攪乱、上昇時に固化材の供給と混合を行なう方式とした。

3.3. 使用機械

実験に使用した主要機械は、表一の通りである。攪拌混合装置は、現在までの研究成果から得られた基本形をもとに試作した写真一の3種類である。

3.4. 固化材

固化材は普通ポルトランドセメントを使用し、水：セメント比 $W/C=1$ としたセメントミルクを改良土の体積比率で添加した。

3.5. 改良効果の調査、試験方法

改良効果の判定は、原則として改良土の一軸圧縮強度および強度のバラツキ(変動係数V)を主体にしたが、その他にセメント含有量調査、掘削によるパイルの出来上り形状調査も行った。

なお、固結土のサンプリングは次のような方法で行なった。

- (1) サンプリング方法 すべてのパイルについて、直径100mm×長さ4m、8mの塩ビパイプを挿入してサンプリングする方式としたが、一部のパイルについては、サンプリング手法と強度の関係を検討するために、従来方式のコアボーリングによる採取方法も併用した。
- (2) サンプリング位置 すべてのパイルについて中心から25cmの位置で連続サンプリングしたが、平面方

固結パイル番号	P-1	P-3	P-5, P-6, P-7	P-10	P-12	P-14
攪拌混合装置	O-I	O-I	O-II	O-IC	O-I	O-I
注入仕様	添加率(%)		15	20	20	20
	注入圧(kgf/cm ²)		20	30	20	40
攪拌仕様	回転数(r.p.m)		41	41	41	41
	上昇速度(m/min)		0.5	0.5	1.0	1.0

固結パイル番号	P-2	P-4	P-8	P-9	P-11	P-13	P-15
攪拌混合装置	O-I	O-I	O-I	O-I	O-II	O-I	O-II
注入仕様	添加率(%)		15	40	30	40	20
	注入圧(kgf/cm ²)		41	41	41	41	41
攪拌仕様	回転数(r.p.m)		0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
	上昇速度(m/min)		0.5	0.5	0.5	1.0	0.5

図二 固結パイルの造成位置と施工条件

機械名	仕様
ベースマシン	日立 PD-100 (全油圧式)
回転掘削装置	三和 D-60H 60PS
攪拌軸	φ152.4mm×12m
攪拌装置	Oval シングル型 (略称O-I型) Oval シングルーカット付 (略称O-IC型) Oval ダブル型 (略称O-II型)
ミキサー	500ℓ×2連成
注入ポンプ	鉦研 MG-15H 11kW " MG-30 22kW " PG-75 55kW
ノズル	φ4.3mm~8.0mm

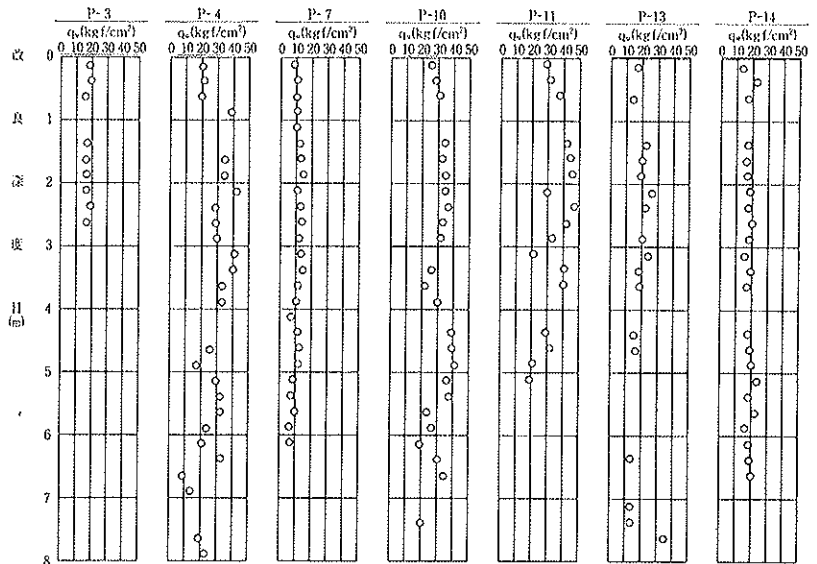
表一 使用機械

向の強度分布を調査したパイルについては、中心から0, 25, 40 cmの位置でサンプリングした。

4. 実験結果と考察

4.1. 各種攪拌混合条件と改良効果

図-3, 図-4は各パイル中心より25 cmの位置でサンプリングした固結土の深度方向一軸圧縮強度分布図である。図-3に示す群のものは比較的改良効果の良いもの、図-4に示す群のものは比較的改良効果の良くないものとして改良強度, 変動係数, および後述する平面強度分布などから総合的に判断して分類したものである。図-4は改良効果の良くないものとしてまとめてはいるが, それでも平均強度 \bar{q}_u はいずれも10 kgf/cm²以上と大きく, また変動係数Vも40%以下と通常地盤改良から考えると良好な結果である。以下, 図中に併記している施工条件と改良効果について詳細に考察する。



攪拌装置形式	O-1	O-1	O-1	O-1-C	O-11	O-1	O-1
添加率 (%)	19	20	15	20	20	20	20
注入圧力 (kg/cm ²)	33	40	20	30	40	30	40
吐出量 (kg/min)	70	75	55	75	75	150	150
回転数 (rpm)	41	41	41	41	41	41	41
昇降速度 (m/min)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	1.0	1.0
\bar{q}_u (kgf/cm ²)	17.3	27.6	12.5	30.4	34.1	18.0	18.4
V (%)	7.4	32.0	20.0	20.4	30.9	27.3	12.0

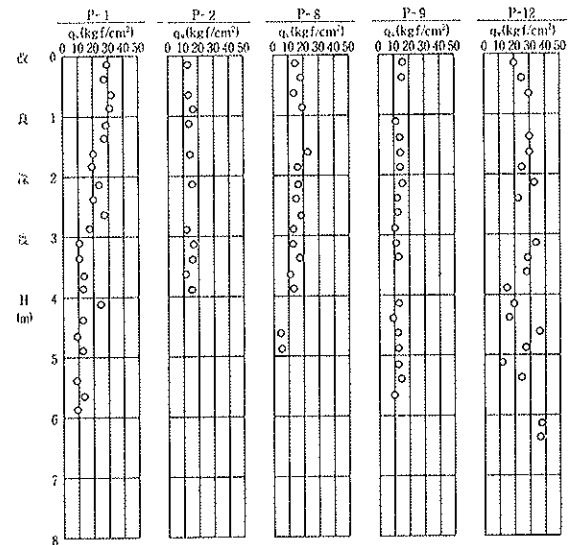
図-3 施工条件と深度方向一軸圧縮強度分布 (比較的改良効果の良いもの)

4.1.1. 攪拌混合装置の種類と改良効果 攪拌混合装置の相違については, P-4 (Oval-シングル型), P-10 (Oval シングルーカッタ付), P-11 (Oval-ダブル型) で比較できる。図より, 3型式の改良効果に顕著な差はみられないが, シングル型よりカッタ付, あるいはダブル型にして攪拌混合を行なう方式の方が若干固結強度が大きくなり, バラツキも少なくなる傾向がみられる。

4.1.2. 固化材添加率 α の影響 施工条件としては, P-3とP-8, P-4とP-9が対応している。両者を比較すると, 当然のことながら, 添加率 $\alpha=20\%$ のP-3, P-4パイルの方が, $\alpha=15\%$ のP-8, P-9パイルよりも固結強度が大きくなっている。このことから改良効果に与える添加率の影響は大きいといえる。

4.1.3. 攪拌軸昇降速度 v の影響 注入圧力が異なるP-1, P-2, P-3, P-4 (昇降速度 $v=0.5$ m/min) とP-12, P-13, P-14 ($v=1.0$ m/min) を比較すると図より, $v=0.5$ m/min の場合, 注入圧力の高い方が改良強度は大きいものに対し, $v=1.0$ m/min の場合は逆に, 注入圧力が高くなると改良強度は小さくなっている。このことは, 注入圧力と強度が昇降速度に影響を受けることを示すものである。

しかし, 変動係数は昇降速度の影響を余り受けず, 注入圧が増すほどバラツキの小さいパイルの出来上がる傾向



攪拌装置形式	O-1	O-1	O-1	O-1	O-1
添加率 (%)	20	20	15	15	20
注入圧力 (kg/cm ²)	5	15	30	40	20
吐出量 (kg/min)	75	75	55	55	150
回転数 (rpm)	41	41	41	41	41
昇降速度 (m/min)	0.5	0.5	0.5	0.5	1.0
\bar{q}_u (kgf/cm ²)	19.4	14.8	14.7	13.0	26.8
V (%)	40.0	12.0	32.0	14.8	35.9

図-4 施工条件と深度方向一軸圧縮強度分布 (比較的改良効果の良くないもの)

がみられることは興味深い。

4.1.4. 注入圧力 p の影響 昇降速度の異なる, P-2とP-12, P-4とP-14を比較すると4.1.3.と同様に

注入圧力と昇降速度が強度に影響を与えていることがわかる。また、平均固結強度と変動係数を総合的に比較すると、改良効果にはこの昇降速度 v と添加率 α によって決まる単位時間当りの吐出量の影響が大きいと考えられる。

4.1.5. ラップ部の改良効果 P-5, P-6, P-7 におけるラップ部の改良効果は図-5 に示すとおりである。ラップ部は非ラップ部より平均強度も大きく、変動係数も減少している。これは明らかに、ラップ部の2回注入、攪拌混合効果が表われていることを示すものである。

なお、パイルを掘り出して出来上り形状を観察したところ、写真-2 に示すように完全に一体化した連続パイルが確認された。

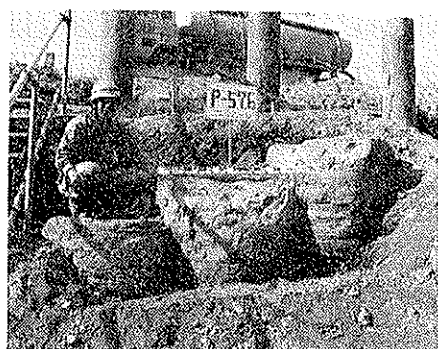


写真-2 連続パイルのラップ状況

4.2. 平面方向の改良効果

4.2.1. 平面方向のセメント(カルシウム Ca)含有量分布 図-6 は、出来上った固結パイルの内、比較的パイル形状の良い P-2 と極めて良好な P-13, P-14 について行なったセメント含有量(カルシウム含有量)の平面分布図である。図より、P-2 は中心部分が最も濃く、外周方向に薄くなっている。外周の Ca 量は中心から 25 cm 以内の約 1/2 であり、25 cm 以内のバラツキ具合とあわせてかなり不均一な混合体であることがわかる。

一方、P-13, P-14 は中心で約 1/2 の濃度であり、外周に Ca 量は多くなっている。しかし、平面的なバラツキは P-2 とは比べものにならないほど混合が均一に行なわれ

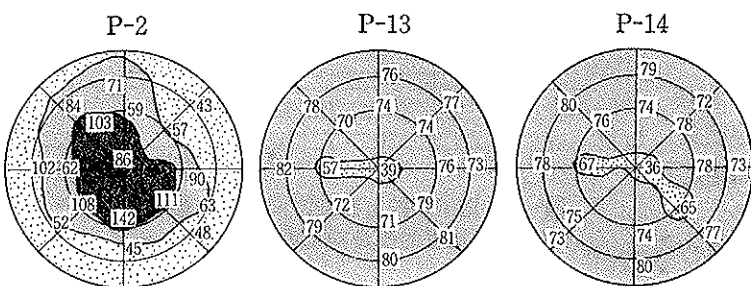


図-6 各パイルのカルシウム含有量分布 (数字はカルシウム含有量 g/kg)

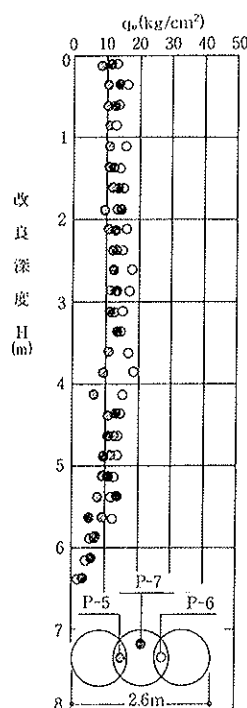


図-5 ラップ部の改良効果

ていることがわかる。

このような相違は、3者の施工条件の比較より、注入圧力および単位時間当りの吐出量の相違により生じているものと考えられる。すなわち、パイル形状の良好なものは、注入圧力大でしかも単位時間当りの吐出量大のものといえる。

4.2.2. 平面方向の強度分布

表-2 は、平面方向の改良効果を調べるために攪拌中心より 0, 25, 40 cm の位置でサンプリングした試料について行なった一軸圧縮試験結果をまとめてその平均強度と変動係数を求めたものである。

P-2 と P-13 の平面強度分布は、先のセメント含有量分布の結果と良い対応を示している。

パイル番号 改良効果 中心からの距離	P-2		P-3		P-8		P-13	
	\bar{q}_n (kg/cm ²)	V(%)	\bar{q}_n (kg/cm ²)	V(%)	\bar{q}_n (kg/cm ²)	V(%)	\bar{q}_n (kg/cm ²)	V(%)
0cm	18.9	30.2	14.1	21.1	17.7	17.6	11.9	26.4
25cm	14.8	12.0	17.3	7.4	14.7	32.1	17.9	35.9
40cm	10.8	35.5	13.8	24.9	1.6	103.4	22.6	25.6
平均値	14.8	25.9	15.1	17.8	11.3	—	17.5	29.3

表-2 各パイルの平面的な強度とバラツキ

ところで、表中 P-8 はパイル中心より 25 cm までしか注入されておらず、正常なパイルとしての出来形(φ1.0 m)を示していないことがわかる。他の三つのパイルはパイルとしての出来形は正常と考えられるが、品質の面で差がある。

この内、例えば P-2 と P-8 の施工条件を比較すると注入圧力が $P=30 \text{ kg/cm}^2$ (P-8) から $P=15 \text{ kg/cm}^2$ (P-2) に減っても添加率が $\alpha=15\%$ (P-8) から $\alpha=20\%$ (P-2) に増加すると外周までミルクが到達している。このことから、改良効果に寄与する施工条件は、先の注入圧力、単位時間当りの吐出量に加えて、添加率も大きく影響するものと考えられる。

したがって、添加率が大き、注入圧力も大、単位時間当りの吐出量も大となる P-3, P-13, P-14 などは、これらの相乗効果により平面強度分布の良い、またバラツキの少ないパイ

ルが出来上ったものと考えられる。

4.3. サンプルング手法による強度比較

図-7は、P-11において実施した塩ビパイプ(φ10cm)による採取と、ダブルコア(φ5cm)によるサンプルング手法の相違による強度の比較を行なったものである。

P-11は、混合条件が良く、極めて良好なパイプが出来上ったものであり、塩ビパイプ、ダブルコアとも平均強度 $\bar{q}_u=34\sim35\text{ kgf/cm}^2$ であり良い一致を示している。このことから、今回考案した塩ビパイプによるサンプルング手法は、強度評価の面のみならず、混合直後早期にその混合状態が把握できることと、連続した試料の採取(この方式では採取率100%)やサンプルング径を自由に可変できることなどの利点があり、今後深層混合工法における固結土のサンプルング評価方法として十分有用であろう。

4.4. 実物大固結パイプの圧縮試験結果

実物大試験用パイプは、P-7と同じ混合条件で造成し混合後60日後に掘り出して径 $\phi=1.0\text{ m}$ 、高さ $h=2.0\text{ m}$ に端面整形し、300トンアムスラーにて圧縮試験を行なった。(写真-3)

その結果、圧縮強度 $q_u=10.2\text{ kgf/cm}^2$ で、P-7パイプの平均強度 $\bar{q}_u=12.5\text{ kgf/cm}^2$ と比較して若干小さ目ながら良い一致を見た。

このことから、今回の塩ビパイプによるサンプルング強度評価方法が十分妥当なものといえる。

5. 掘削によるパイプの出来型調査結果

パイプ造成後約60日経過した時点で試験地盤を掘削しパイプの出来上り形状を観察した



写真-3 実物大パイプ圧縮試験状況

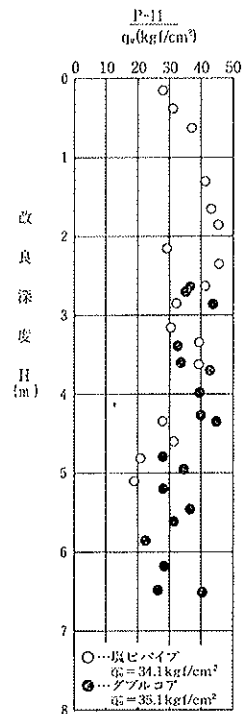


図-7 サンプルング手法の相違に関する強度比較

結果、

- (1) 施工条件によって各パイプの固結強度の大きさ、バラツキに差が認められたが、すべてのパイプが造成されていた。(写真-4)
- (2) パイプ径は、ほぼ攪拌翼径と同等のφ1.0mであった。
- (3) 特に、P-12~P-14は滑らかな外周部の形状を示し、あたかも場所打ちコンクリート杭のようであった。(写真-5)
- (4) 連続パイプのP-5、P-6、P-7は完全に連結しており連続パイプとしての機能を十分有することがわかった。(写真-2)

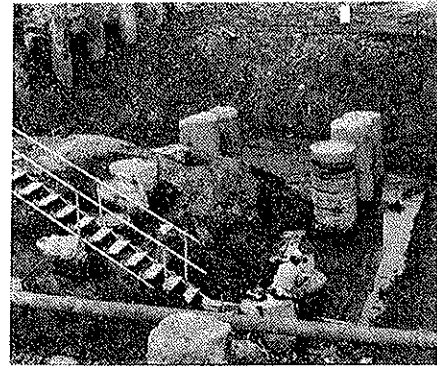


写真-4 パイプ造成地盤の掘削状況

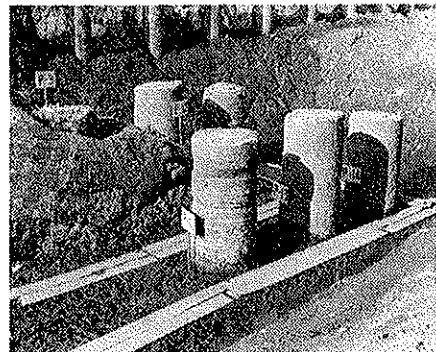


写真-5 掘削後に表われた固結パイプ

6. あとがき

以上、自然地盤を対象とした現場試験においても、開発したOval型攪拌混合装置は、パイプの品質、出来上り形状において良好な改良効果を発揮することを確認した。その後、この試験結果を踏えて各本工事に適用されその成果をいかんなく発揮している。これらの結果については追って報告したいと考えている。

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