

# 深層混合処理工法について (その3)

斎藤二郎 西林清茂  
松尾龍之 細谷芳己

## Improvement of Deep Soft Ground by Cement Mixing (Part 3)

Jiro Saito Kiyoshige Nishibayashi  
Tatsuyuki Matsuo Yoshimi Hosoya

### Abstract

Part 1 and Part 2 of this report described studies on mixing of stabilizer with objective soil in improvement of deep soft ground by carrying out laboratory model mixing experiments. This time, the authors carried out field experiments of nearly actual scale using the mixing method found to be the most effective in the model experiments.

The experiment was conducted making a test ground in a soil box 7.5m (length) × 2.5m (width) × 4.0m (depth) and mixing piles of 1m (diameter) × 3m (depth) in this ground. Good-quality piles with little scatter in improved strengths were made even though mixing diameters were increased.

### 概要

前々報<sup>1)</sup>, 前報<sup>2)</sup>の(その1), (その2)では, 深層混合処理工法における固化材と対象土の混合について, 室内モデル実験を行ないながら検討したことについて述べた, 今回, このモデル実験で最も混合効果の大きかった攪拌混合装置を用いて, 攪拌径, 攪拌深度を増大し, 実際規模に近い条件でフィールド実験を行なった。

実験は, 7.5m(縦)×2.5m(横)×4.0m(深さ)の大型土槽内に試験地盤を作り, その中に各種混合条件のもとで, 攪拌径φ1m 攪拌深度3mの混合パイルを造成したもので, 攪拌径が増大しても, 改良強度のパラツキが少ない良好な混合パイルが造成された。

### 1. まえがき

深層混合処理工法における固化材と対象土の混合に対しては, 所報 No. 21<sup>1)</sup>, No. 22<sup>2)</sup>で述べたように, ①固化材の均等供給方法と②混合効果大の攪拌羽根形状の2点に焦点を絞って, 100ケース近くの室内モデル実験を行ないながら実験的に検討してきた。その結果, スラリー状固化材の供給方法としては, 固化材吐出口付近に設けた注入補助羽根併用の注入方式が, また, 注入された固化材と土の混合に対しては, だ円形攪拌羽根が改良効果の面で最も優れていることが判明し, 両者を組み合わせた, だ円型攪拌混合装置を開発した。

今回はこの攪拌混合装置による改良効果を更に調査するために, 実際規模の直径1mの攪拌翼径を使用したフィールド実験を行ない, 各種混合条件下における改良効

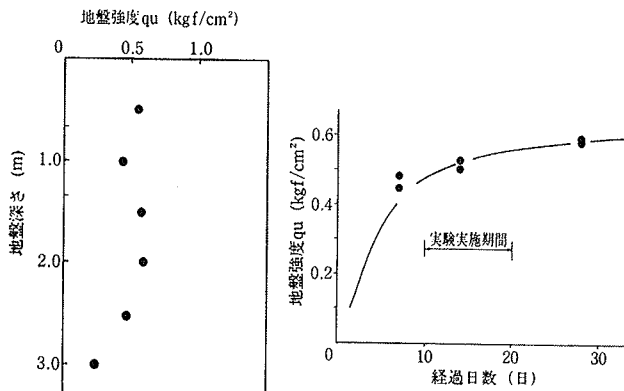
果を実験的に比較検討した。

以下, これらの実験結果について述べる。

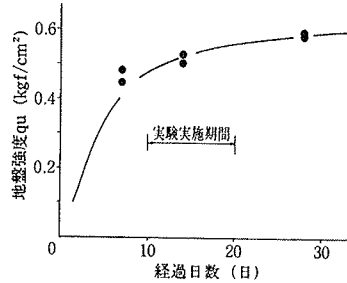
### 2. 試験地盤

試験用の粘性土地盤は, 縦7.5m×横2.5m×深さ4.0mの大型土槽内に作成した。使用した粘性土は浄水場の発生土であり, 大型ミキサによる混練り調整の際, セメントを5%添加して土槽内に投入した。その後, 所定の強度である一軸圧縮強度 $qu \approx 0.5 \text{ kg/cm}^2$ が得られるまで養生し, 試験に供用した。地盤強度をこの値に設定したのは, 一般に対象土の粘土が大きくなるとスラリー状固化材との混合が困難になることを考慮したためである。

図-1は供用時点での地盤強度であり, 表-1はその物理性状である。なお, 図-2は地盤強度の経時変化で



図一1 地盤強度



図一2 地盤強度の経時変化

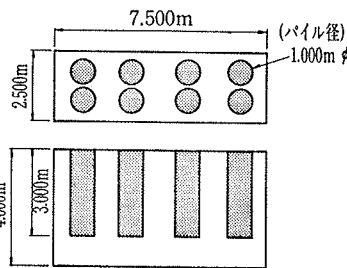
試験項目		試験値
比重 Gs		2.61
粒度組成	レキ分 (%)	0
	砂分 (%)	4
	シルト分 (%)	59
	粘土分 (%)	37
コンシス	液性限界 (%)	130
	塑性限界 (%)	63
	塑性指数	67
含水比 w (%)	110	
湿潤単位体積重量 $\gamma_r$ (g/cm³)	1.38	

表一1 粘性土の物理性状

あるが、試験施工中の強度変化は小さい。

### 3. 実験概要

固結パイルは、図一3に示す配置に直径 1m×深さ 3mのものを8本造成した。その内の2本は機械類の調整のための予備パイルであり、残りの6本について各種混合条件下での改良効果を比較検討した。



図一3 パイル配置図

#### 3.1. 攪拌混合方式

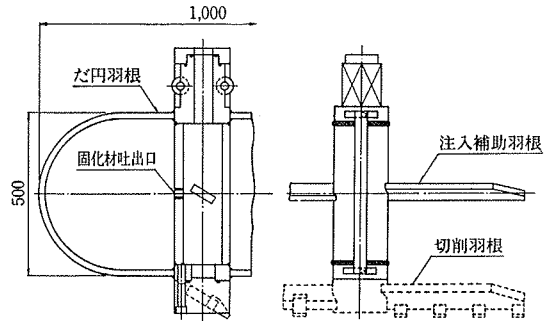
攪拌軸下降時に地盤の掘削と攪乱、上昇時に固化材の供給と混合を行なうバッチ式混練方式である。

機械名	仕様
攪拌機本体	30kW×580kg-m
ミキサー	0.6m³×2連成
受けホッパ	0.5m³
中継用グラウトポンプ	145ℓ/min(BG-15)
アシテータ	1.0m³
注入用グラウトポンプ	125, 250ℓ/min(MG-40)
電磁流量計	FMA-1.000

表一2 使用機械一覧表

#### 3.2. 使用機械

実験に使用した主要機械は、表一2のとおりである心臓部の攪拌混合装置は、図一4に示すように吐出口とその注入補助羽根および円形攪拌羽根を組み合わせたもので、先端に硬質地盤用の切削羽根をアタッチメントとして取りはずし出来る構造である。



図一4 混合攪拌装置

#### 3.3. 固化材

使用した固化材はセメントミルクで、水・セメント比を W/C=1 の一定配合とした。

#### 3.4. 攪拌混合条件

攪拌軸回転数 50 rpm、セメントミルク添加率30%一定とし、注入攪拌時の引上げ速度  $v$ 、ミルク吐出圧力  $P$  を変化させた。攪拌混合条件を表一3に示す。

Case5	Case6	Case4	Case3
予	予	Case2	Case1

ケース番号	引上げ速度 $v$ (m/min)	注入圧 $P$ (kgf/cm²)	混合回数 $N$ (往復)	備考
1	0.50	30	1	
2	0.50	30	2	
3	0.50	50	1	
4	0.50	30	1	切削羽根付
5	1.00	30	1	
6	1.00	50	1	

表一3 攪拌混合条件

#### 3.5. 改良土の調査、試験方法

改良効果の調査は、固結パイルの強度を主体に行なった。すなわち、混合施工直後に径 10 cm×長さ 4 m の塩ビパイプをパイル中心から 0, 25, 40 cm の位置に押し込んで2日間養生した後に採取し、材令28日の時点で、一軸圧縮試験を実施した。なお、一部については、材令60日で実施したものもある。また、団結土の特性を調査するために、三軸圧縮試験も同時に行なった。

効果の判定は、一軸圧縮強度の測定値から各々のパイルの平均強度  $\bar{q}_u$ 、強度のバラツキ  $V$  を比較した。バラ

ツキVの値は、変動係数 $V$ (標準偏差 $\sigma/\bar{q}_u \times 100$ )を算定したものである。

また、これらの調査の他に、混合後30日経過した時点で、写真-1に示すように固結パイルを掘削し、固結形状、固結状態を観察した。



写真-1 固結パイルの掘削状況

#### 4. 実験結果および考察

##### 4.1. 各パイルの固結強度特性

図-5に各パイルの一軸圧縮強度を示す。固結強度は、全体的に見てCase 3が $q_u = 5 \sim 15 \text{ kgf/cm}^2$ と一番大きく、次いでCase 2の $q_u = 5 \sim 10 \text{ kgf/cm}^2$ 、Case 1の $q_u = 5 \text{ kgf/cm}^2$ であり、Case 4~Case 6はいずれも $q_u \leq 5 \text{ kgf/cm}^2$ と小さい。

表-4は、各パイルの全採取位置における固結強度の平均とそのバラツキを表わす変動係数の値である。まず、固結土の平均強度で比較すれば、特にCase 1~Case 3の改良効果が大い。次に変動係数についてみると、Case 1~Case 4はいずれも $V \leq 20\%$ であり、良好な結果である。

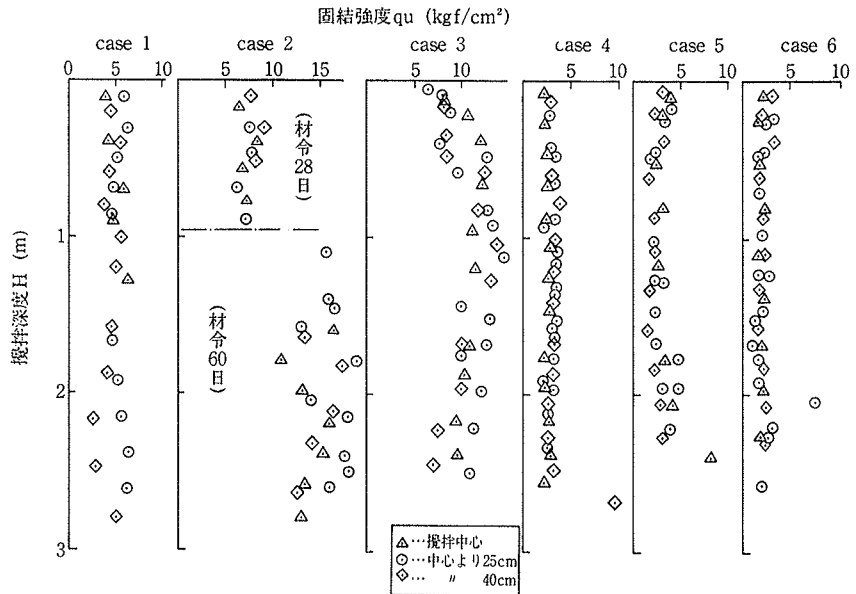


図-5 各パイルの改良強度

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6
平均固結強度 $\bar{q}_u$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	5.1	7.0 * 15.0	10.8	2.71	2.07	2.10
変動係数 V (%)	16.5	9.0 * 15.1	18.4	18.1	45.9	35.8

\*60日材令

表-4 各パイルの平均固結強度とバラツキ

##### (1) 注入攪拌時引上げ速度 $v$ の影響

引上げ速度 $v$ と平均強度 $\bar{q}_u$ および変動係数 $V$ の関係を示したのが図-6である。混合条件としては、Case 1とCase 5、Case 3とCase 6が対応している。

図より、引上げ速度が改良効果に及ぼす影響は大きく $v = 0.5 \text{ m/min}$ から $1.0 \text{ m/min}$ に上げると固結強度は大幅に低下し、そのバラツキも大きくなる。

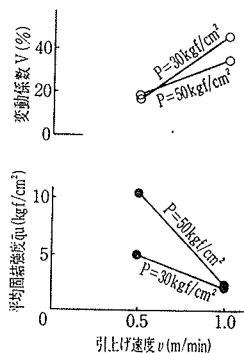


図-6 引上げ速度  $v$  の影響

##### (2) 吐出圧力 $P$ の影響

図-7は、吐出口より噴射されるセメントミルクの吐

出圧力 $P$ と平均強度 $\bar{q}_u$ および変動係数 $V$ の関係である。混合条件としてはCase 1とCase 3、Case 5とCase 6が対応している。

図より、吐出圧力は $P = 30 \text{ kgf/cm}^2$ より $50 \text{ kgf/cm}^2$ と高い方が改良効果があがっている。しかし、引上げ速度が $v = 1 \text{ m/min}$ と速くなると、吐出圧力の効果は顕著には認められず、バラツキが若干小さくなる程度である。

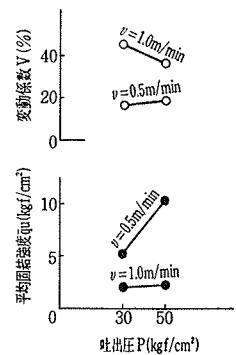


図-7 吐出圧力の影響

図-8は、この吐出圧力を含めた改良強度の平面的な分布を調べたものである。対象とした深度は $1 \text{ m} \sim 2 \text{ m}$ であるが、Case 2については試料採取の都合上 $0 \text{ m} \sim 1 \text{ m}$ の間のもので代表させた。

図より、Case 1, 4, 5, 6はいずれも外周に向うに伴って強度低下しているが、Case 2, 3は強度大なのはもちろん、セメントミルクが十分行きわたって均一性の良

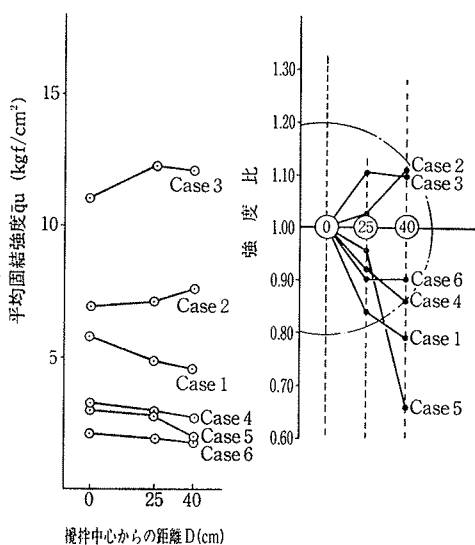


図-8 固結強度の平面分布

いパネルが造成されたことを表わしている。両者は、いずれも注入攪拌時の引上げ速度が  $v = 0.5 \text{ m/min}$  で、吐出圧力を  $P = 50 \text{ kgf/cm}^2$  と大きくして外周までセメントミルクを十分送り出すか、攪拌混合係数を2回に増やした場合である。

(3) 混合回数 N の影響

図-9は、攪拌軸の往復回数 N と平均強度  $\bar{q}_u$  および変動係数 V の関係である。混合条件は Case 1 と Case 2 が対応している。

図より、混合回数が2回に増加すると強度は約40%大きくなり、変動係数も約半分に低下しており、混合回数の増加により改良効果が増していることがわかる。

(4) 切削羽根の影響

切削羽根の影響を調べるために、同一混合条件の

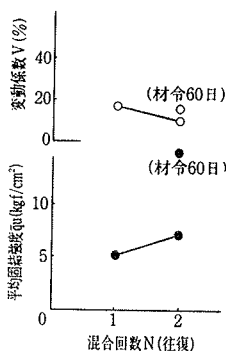


図-9 混合回数 N の影響

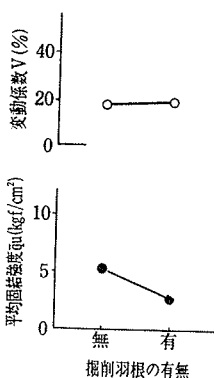


図-10 切削羽根の影響

Case 1 と Case 4 を比較したのが図-10である。図より、切削羽根によって改良効果は著しく低下している。この原因については、まだ解明するにいたっていないが、切削羽根の形状、設置位置などが改良効果に影響することが考えられる。

4.2. 室内混合実験値とフィールド混合実験値の比較

4.1. で各種混合条件がパイル強度に与える影響を考察したが、各 Case のうち、引上げ速度  $0.5 \text{ m/min}$ 、攪拌

軸回転数  $50 \text{ rpm}$ 、セメントミルク吐出圧力  $50 \text{ kgf/cm}^2$  の Case 3 が、改良強度  $\bar{q}_u \approx 11 \text{ kgf/cm}^2$ 、変動係数  $V \approx 18\%$  と最も良い改良効果を示した。

図-11は、ソイルミキサで十分混合した改良土のセメントミルク添加率と強度の関係である。フィールド実験と同じ添加率30%の室内強度は、 $q_u \approx 20.5 \text{ kgf/cm}^2$  を示している。

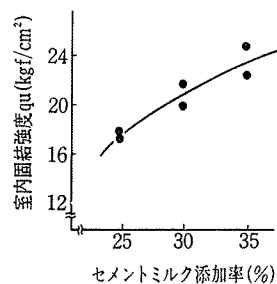


図-11 室内混合結果

両者の強度を比較すると、フィールド実験の Case 3 の混合条件下で造成したパイルの強度は、室内混合の理想的な強度に比べて、約50%の強度発現を確保したことになる。

4.3. 固結パイルの形状

写真-1に示したように、改良後の固結パイルの出来上り形状を観察するために、深さ2mまで掘削した。深さ50cmピッチに測定した各パイルの径は、図-12に示すとおりである。

図より、固結パイルは攪拌翼の径が1.0mにもかかわらず、径102cm~113cmといずれのCaseも攪拌径より大きいパイルが出来上がっており、中でもセメントミルク吐出圧が  $P = 30 \text{ kgf/cm}^2$  よりも  $50 \text{ kgf/cm}^2$  と高くなった場合に、大きくなる傾向がみられる。

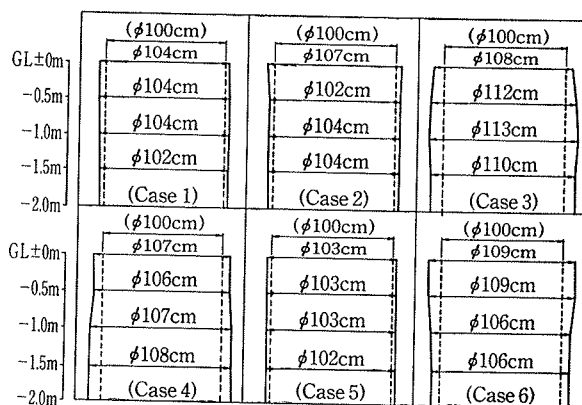


図-12 固結パイルの形状

5. 改良土の調査・設計に係わる諸特性の検討

深層地盤を固化材で改良した場合、その改良地盤の強度・変形特性を知るための室内試験として一軸圧縮試験が多用されている。しかし、一軸圧縮試験は地中応力状態を正しく再現するものではないので、厳密には拘束圧を考慮した直接せん断、あるいは三軸圧縮試験でその強度、変形特性を知ることが必要となる。

ここでは、フィールド実験で得られた改良土を使用し

て、その一軸圧縮試験および三軸圧縮試験による強度・変形特性の相違と改良効果判定への適用性について検討する。

### 5.1. 一軸および三軸圧縮試験による強度・変形特性の相違

図-13は、各 Case 2本ずつの代表的な試料における一軸および三軸圧縮試験（UU）の応力～ひずみ曲線である。

図より、三軸試験の値は側圧の影響で一軸試験の値よりもピーク強度が高いのは当然であるが、残留ひずみに依存する強度のねばりは三軸試験の方が圧倒的に大きいことがわかる。

三軸が一軸に比較して、残留強度が大きいことは同様に三木らも述べているところであり<sup>3)</sup>、改良地盤の変形解析を行なう場合、この地中応力、ひずみ依存性を考慮できる三軸圧縮試験の方が有用と考えられる。

一方、改良効果の判定に関しては、一般にピーク強度で比較しており、図にみられるように一軸でも三軸でも同様に改良強度の差として判断できる。したがって、改良効果の判定には簡便な一軸圧縮試験で十分と考えられる。

### 5.2. $E_{50} \sim q_u$ の関係

改良土の変形係数  $E_{50}$  は、改良地盤の変形問題を解析する上で重要な土質定数である。一般には、改良土の改良特性を表わす有用なインデックスである  $q_u$  値との相関性を求めて設計・解析に供用しているのが通例である。

図-14は、今回のフィールド実験で得られた一軸圧縮強度  $q_u$  とこの  $q_u/2$  の強度に対応する剛性  $E_{50}$  の関係である。バラツキはあるが、両者の間にはかなり良い相関性が認められ、およそ

$$E_{50} = 200 \cdot q_u$$

なる関係が認められる。

この変形係数  $E_{50}$  は、安定処理効果の指標として有用であるが、変形問題に適用する場合は、対象土の種類、固結土の不均一性、拘束圧、試料径などが関係してくると思われるので、その適用に当ってはこれらの諸条件を十分考慮した試験・解析方法の検討が今後の研究課題であろう。

## 6. あとがき

ある程度の強度を有する粘性土地盤の改良工法として、深層混合処理工法が急速に発展してきたが、現在最大の難点になっているのは改良土の均一性であり、このための攪拌混合装置の開発である。

我々は、ここ数年各種の攪拌混合機構について室内実験的に研究を進めてきており、最も良好な改良効果を示

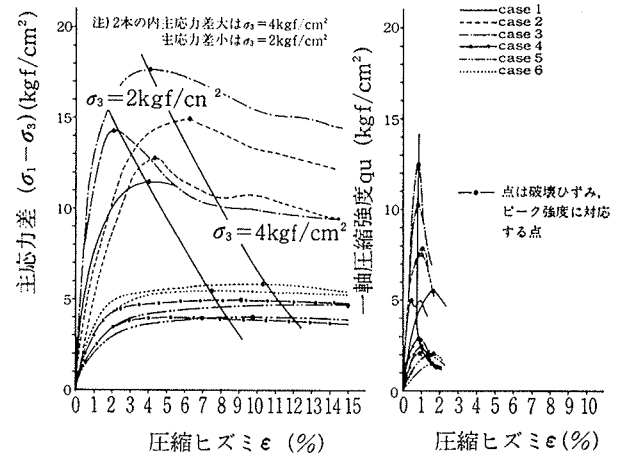


図-13 一軸および三軸圧縮試験による応力～ひずみ曲線

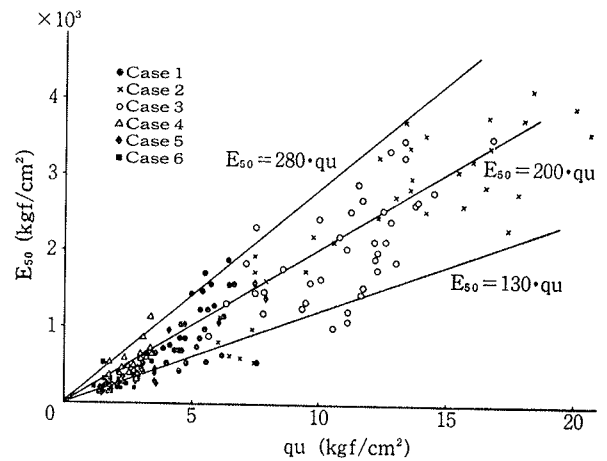


図-14 固結土の  $E_{50} \sim q_u$  の相関性

すだ円型攪拌混合装置を開発した。

今回、この装置を用いて実際規模のフィールド実験を行ない、装置の有用性を確認した。

また、本装置による各種混合条件下での改良効果のみならず、将来実際施工を行なうに際しての機械的な問題、施工条件、設計・解析に対する考え方などについて貴重な資料を得ることができた。

これらについては、今後とも鋭意研究を進めてゆく予定である。

## 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) 三木, 五十嵐, 龍岡: セメント系固結土の一軸及び三軸圧縮試験による強度, 変形特性, 土木学会第35回年次学術講演会講演概要集, 第3部, (昭和55. 9), pp. 277~278