

# フライアッシュを用いた深層混合処理工法（FGC-DM）の開発

## Development of the Deep Mixing Method using FGC Blended Slurry for Soil Stabilization

元木卓也\*・鶴谷広一\*\*

MOTOKI, Takuya and TSURUYA, Hiroichi

\* (財) 沿岸開発技術研究センター 企画部 研究員

\*\* 東海大学 海洋研究所 教授 (前 (財) 沿岸開発技術研究センター 理事)

FGC-DM is a Deep mixing soil stabilization method using (FGC) blended slurry containing coal ash (F), gypsum (G), and cement (C). In addition to the characteristics to give the equivalent strength with the normal cement deep mixing method (CDM), this method can form improved ground with quite the low strength less than  $0.5\text{MN/m}^2$  in small deviation, which is difficult to prepare using the CDM. This paper describes the results of laboratory tests and an example of application for the earth retaining structure using FGC-DM.

*Key Words : FGC, deep mixing soil stabilization, coal ash*

### 1. はじめに

現在、我が国では石炭火力発電所において年間約 500 万トンのフライアッシュが発生しており、発生量の 70% 程度がセメント原料等に有効利用されているが、残りの大半は管理型処分場で処分されている。

フライアッシュについては、軽量性、ポズラン反応性、流動性等の特性から、軟弱地盤表層改良、ケーソン裏込め、管理型処分場遮水材等に適用するための調査・研究が実施されている。また平成 13 年度に国土交通省では「港湾・空港等整備におけるリサイクルガイドライン」が制定され、その中にリサイクルの取り組み方針が示されており、フライアッシュ等の産業副産物を今後有効に活用する方向性が定められた。

(財) 沿岸開発技術研究センターでは、電源開発株式会社、独立行政法人港湾空港技術研究所および国土交通省関東地方整備局の協力のもとに、フライアッシュ(F)と石膏(G)およびセメント(C)のFGCスラリーを軟弱地盤改良工法である深層混合処理工法に適用するための技術開発を平成5年度から平成13年度にかけて実施した。本論文は、この技術開発に関する各種試験および本工法を適用した土留め工法の適用性について述べたものである。

### 2. FGC-DM の概要と特徴

深層混合処理工法とはセメントスラリーを軟弱地盤内に攪拌混合し、化学的な固結作用によって強固な地盤を造成するものである。この工法は通常 CDM (Cement Deep Mixing) 工法と言われる。この工法の問題点としては、攪拌混合するスラリー量が少ないと (一般的には原地盤土  $1\text{m}^3$  に対して約 90ℓ 以下) 均一な攪拌混合が困難となり、改良地盤の強度に大きなばらつきが生ずることから、ス

ラリーを多めに加えるので、必要強度以上の不経済な施工になる場合がある。

FGC 深層混合処理工法 (FGC-DM 工法) は上記の CDM 工法に対して、フライアッシュ (F)、石膏 (G) およびセメント (C) の三種材料 (FGC) の混合スラリーを利用した化学的な固結工法である。概要を図-1 に示す。

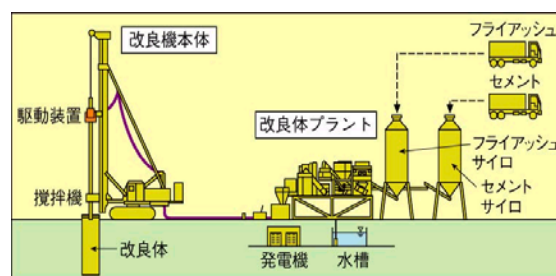


図-1 FGC-DM 工法の概要

FGC-DM 工法では、CDM 工法と異なり、安定材としてセメントの他にフライアッシュを添加することによって、同一のセメント添加量でも従来の CDM 工法に比べて地盤と混合する総スラリー量を増やすことができる。このため、FGC-DM 工法によれば、CDM 工法では均一な攪拌混合が難しい低強度域の均一改良が可能となる。

また、石こうを添加することにより、エトリンガイドが生成され強度発現は向上し、セメントの節約等の経済的な配合が可能となる。

CDM 工法では、原地盤に注入する安定材スラリーの注入量がある一定値以上確保されない改良強度に大きなばらつきが発生するという短所があるために、一定量以上の安定材スラリーを注入する必要がある。図-2 に各配合比の安定材スラリー量と一軸圧縮強さの (材令 28 日) 関係の一例を示す。

この図によると、地盤の均一攪拌に必要な安定材のス

ラリー量が90~300 l/m<sup>3</sup>の範囲のとき発現した一軸圧縮強さは、CDM工法で1.2MN/m<sup>2</sup>以上であるのに対し、FGC-DM工法では、0.1~2.5MN/m<sup>2</sup>程度の低強度から高強度までの広範囲の強度発現が可能である。低強度改良ができることにより下記に示すメリットが期待出来る。

- ① 改良地盤に直接鋼杭や鋼(鋼管)矢板などを打ち込むことが容易であるため、CDM改良地盤で必要とされる高圧噴射工法等の補助工法が不要となり、施工性・経済性が向上する。
- ② 改良地盤の掘削が容易となる。
- ③ 掘削残土などの処理やリサイクルが容易となる。

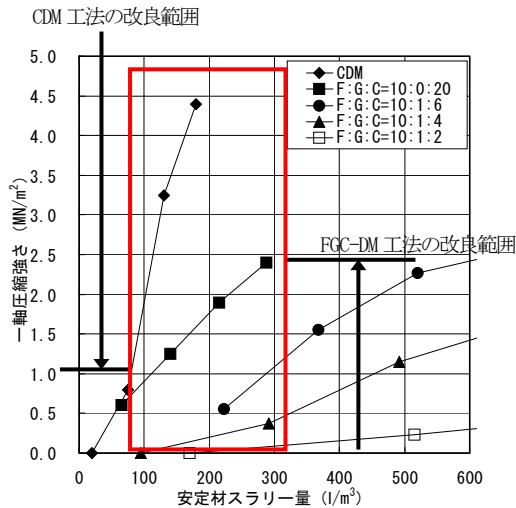


図-2 安定材スラリー量と一軸圧縮強さ<sup>1)</sup>

### 3. 改良土の工学的性質

#### 3.1 一軸圧縮特性

FGC-DM工法改良土の現場サンプルによる一軸圧縮強さと破壊時のひずみの関係を図-3に示す。このサンプルの配合は、水をWとすると、W/(F+G+C)=70~100(%)、セメント添加量が20~140kg/m<sup>3</sup>である。

図-3より、FGC-DM工法では配合条件を変えることにより0.1~1.0(MN/m<sup>2</sup>)の広い強度域の改良地盤が得られる。また、破壊時の軸ひずみは一軸圧縮強さが0.1MN/m<sup>2</sup>以上で0.5~2%、0.1MN/m<sup>2</sup>以下では強度が低くなるに従って破壊ひずみは大きくなり、5~10%の範囲を示す。

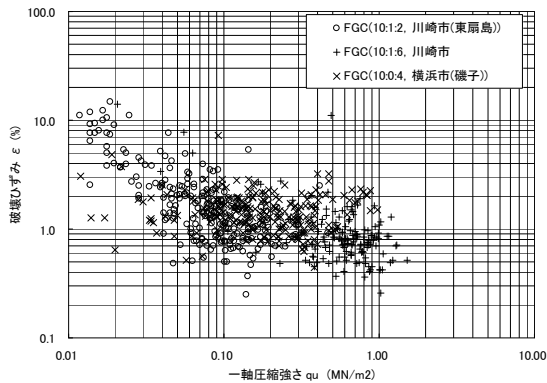


図-3 一軸圧縮強さと破壊時ひずみの関係

### 3.2 三軸圧縮特性

試験条件を表-1に、試験結果を図-4に示す。

項目	内容
粘性土	横浜市(磯子)
フライアッシュ	電源開発株式会社磯子火力発電所
セメント	普通ポルトランドセメント
配合	一軸圧縮強さ( $q_u$ )にて100, 200, 400(kN/m <sup>2</sup> )となるように配合 養生期間: 14日
圧密圧力	1/4 $q_u$ , 1/2 $q_u$ , $q_u$ , 2 $q_u$ , 4 $q_u$ の圧力に設定

図-4を見ると、各圧密圧力(側圧)において、ある一定値までの圧密圧力以下では最大主応力差( $\sigma_1 - \sigma_3$ )は圧密圧力(側圧)に関係なく一定値をとることがわかる。この境界の圧密圧力(側圧)は改良土の一軸圧縮強さの約1/2である。

よって、この圧密圧力(側圧)の範囲内では、主応力差( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) $\div$ 一軸圧縮強さ( $q_u$ )となることから、改良土のせん断強度[( $\sigma_1 - \sigma_3$ )/2]は一軸圧縮強さの約1/2になることがわかる。

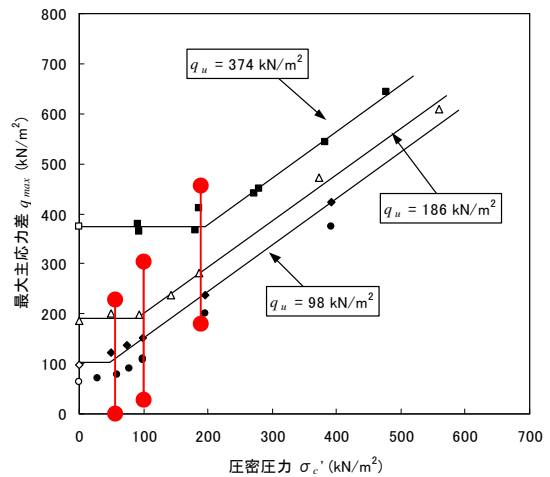


図-4 圧密圧力とせん断強度の関係

### 4. 土留め構造物への適用

#### 4.1 土留め構造物への適用

軟弱地盤における土留め工事においては、受働土圧の増加と底部破壊の防止を目的として掘削底部を改良する工法が採用される。

この工法に対してFGC-DM工法の低強度の地盤改良を用いると、所定の受働土圧を確保しつつ、改良地盤に土留め矢板を直接打ち込むことが出来ることから、土留め長さの低減や矢板周辺のグラウトが不要になる等、経済的な土留めが可能となる。

このことを実証するため、電源開発株式会社磯子火力発電所更新工事の土留め構造物に採用して現場計測及び事前の遠心載荷実験を行った。

## 4.2 水平方向地盤反力係数

FGC-DM 改良地盤の土留め矢板に対する水平方向地盤反力係数を検討するために、現場計測及び遠心載荷模型実験を行った。

### (1) 現場計測結果による水平方向地盤反力係数の評価

礫子地点におけるFGC-DMの配合を表-2に示す。また、図-5に礫子地点の山留め構造の概要を示す。

表-2 FGC-DM 配合

項目	単位	対象土1m <sup>3</sup> 当たりの重量	備考
セメント添加量(C)	kg/m <sup>3</sup>	62	F:C=10:4
フライアッシュ量(F)	kg/m <sup>3</sup>	155	W/(F+C)=100%
単位水量(W)	kg/m <sup>3</sup>	217	

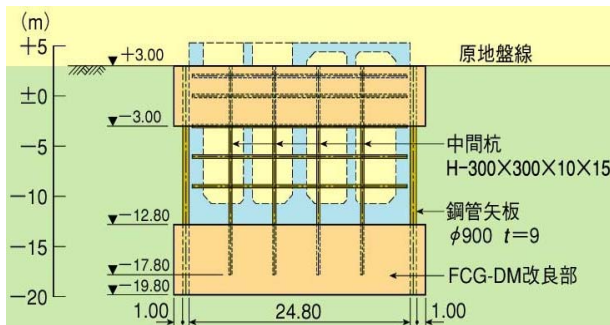


図-5 礫子地点 FGC-DM を用いた山留め構造の概要

土木学会基準をはじめ多くの設計基準に採用されている吉中の研究より導かれた水平地盤反力係数の算定式(以降「吉中の式」と称す)は式(1)の通りである。

$$k_h = \frac{1}{0.3} \cdot \alpha \cdot E_0 \cdot \left(\frac{B}{0.3}\right)^{-3/4} \quad (1)$$

$k_h$ : 水平方向地盤反力係数 (kN/m<sup>3</sup>)  $E_0$ : 各種試験より求まる地盤の変形係数 (kN/m<sup>2</sup>)  $\alpha$ :  $E_0$ の算定法に対する補正係数  $B$ : 載荷幅 ( $B=10$ m)

現場計測結果を基に算出した計測値と吉中の式より、算出した水平地盤反力係数を比較した結果、計測値は吉中の式より算出される理論値の約4割という小さな値となった。

この原因としては、補正係数 $\alpha$ 、改良地盤の材料特性等が考えられるが、補正係数 $\alpha$ についてはFGC-DM改良地盤において行われた様々な原位置試験結果を基に、 $\alpha$ について吉中の式における補正係数を適用できることが判明した<sup>2)</sup>。

一般的にセメント安定処理土は脆性的な材料である。脆性材料の破壊にいたるまでの挙動は弾性体に近く、吉中の式においても、対象地盤を弾性体と仮定すると次式で表すことができる。

$$k_h = \frac{1}{0.3} \cdot \alpha \cdot E_0 \cdot \left(\frac{B}{0.3}\right)^{-1} \quad (2)$$

図-6のA.P. -12.0mの応力-ひずみ曲線は、脆性的な破壊挙動を示し明確な降伏点が見られるものと、延性的

な破壊挙動を示すものが混在している。この深度における土圧計から算定された水平方向の地盤反力と変位の関係を図-6に示す。この図よりAP-12.0mでは、実測結果には吉中の式(1)と弾性体の式(2)の中間に位置している。

一方、A.P. -13.5mの応力-ひずみ曲線は脆性的な破壊挙動を示し明確な降伏点が見られ、図-6の水平方向の地盤反力と変位の関係も弾性体(式(2))に近いことが分かる。

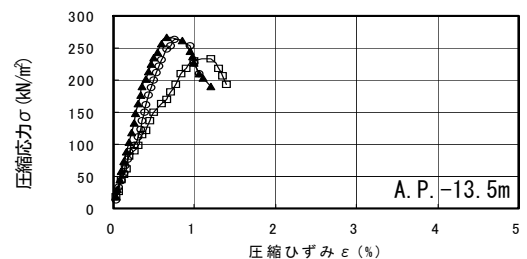
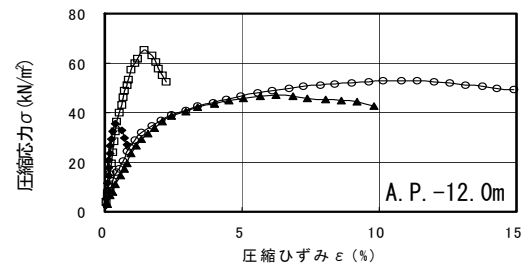


図-6 計測地点近傍の一軸圧縮試験 応力～ひずみ曲線

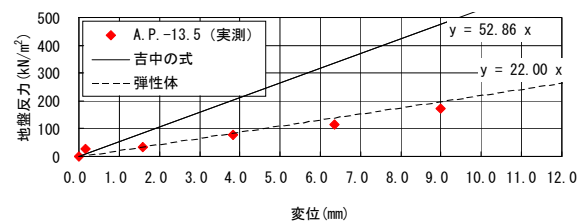
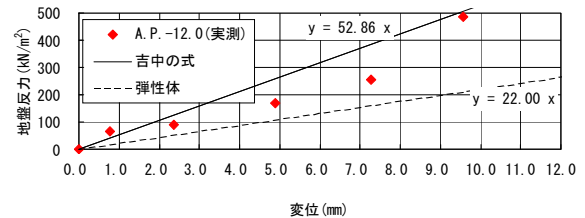


図-7 土留め矢板変位と地盤反力の関係

### (2) 遠心載荷実験による水平方向地盤反力係数の評価

水平方向地盤反力係数を検討するため、現場適用以前に遠心載荷模型実験を実施している。この結果について、上記の FGC-DM 改良地盤の水平方向地盤反力係数の低減を考慮した式(2)の適用性について検討を行った。遠心載荷模型実験モデルを図-8に示す。また、遠心載荷模型実験で計測された土圧と山留め矢板の水平方向変位量との関係を表-4に示す。

遠心載荷実験結果から得られた FGC-DM 工法改良地盤の水平地盤反力係数は、式(2)により算定された値と概ね一致することがわかった。

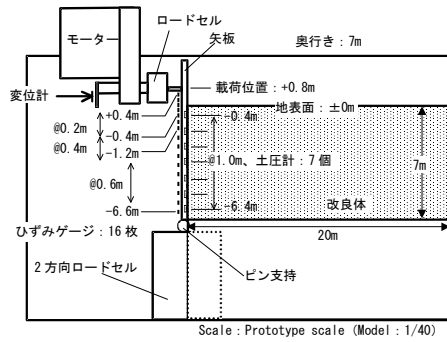


図-8 遠心載荷実験モデル

表-4 水平方向地盤反力係数 (遠心載荷模型実験)

	一軸圧縮強さ (kN/m <sup>2</sup> )	吉中の式 (kN/m <sup>2</sup> )	FGCの式 (kN/m <sup>2</sup> )	実測値 (kN/m <sup>2</sup> )
ケース1	196.0	4,200	1,670	1,000~2,500
ケース2	392.0	15,700	6,270	3,000~7,500

## 5. 溶出試験

サンプリング試料を用いて溶出分析を行い土壤環境基準との比較を試みた。分析結果を表-5に示す。

試験項目は下記の基準に準拠した27項目とした。

- ① 「土壤汚染に関わる環境基準について」  
(環境庁告示第46号)
- ② 「ダイオキシン類による大気汚染、水質汚染及び土壤の汚染に関わる環境基準について」  
(環境庁告示第68号)

これら試験結果によれば、b地点のホウ素を除き、全ての項目における値は基準値以下である。

特に、六価クロムに関しては、セメント系固化材による六価クロムの溶出について各種の対応策が通達され環境に対する配慮がなされているが、FGC-DMでは3地点ともに土壤環境基準に対して定量下限値未満または微量になっている。

ダイオキシン類に関しては、基準値1,000pg-TEQ/gを大きく下回る結果となった。

b地点のホウ素については、基準値1mg/lを越えているが、ホウ素は一般に遊離のホウ酸またはホウ酸塩の形で地球上に広く分布しており、海水で4~5mg/l、淡水で0.2~1.2mg/l程度の濃度で存在している。b地点の現場は海に隣接した地点であり、今回の試験結果は海水の影響を受けていると考えられる。なおホウ素については、フライアッシュ等の再利用物の扱いとして、平成13年3月28日の土壤環境に対する答申等では以下のとおり記載されている。

「道路用等の路盤材や土木用地盤改良材等として利用される場合は周辺の土壌と区別出来ることから、これらは適用しない」

したがって、地盤改良材は適用外となっている。

表-5 溶出試験結果

項目及び単位	基準値	測定値		
		a地点	b地点	c地点
カドミウム	mg/l <0.01	ND	ND	ND
全シアン	mg/l 不検出	不検出	不検出	不検出
有機磷	mg/l 不検出	不検出	不検出	不検出
鉛	mg/l <0.01	ND	ND	ND
六価クロム	mg/l <0.05	ND	0.01	ND
砒素	mg/l <0.01	0.006	ND	ND
総水銀	mg/l <0.0005	ND	ND	ND
アルキル水銀	mg/l 不検出	不検出	不検出	不検出
PCB	mg/l 不検出	不検出	不検出	不検出
ジクロロメタン	mg/l <0.02	ND	ND	ND
四塩化炭素	mg/l <0.002	ND	ND	ND
1,2-ジクロロエタン	mg/l <0.004	ND	ND	ND
1,1-ジクロロエチレン	mg/l <0.02	ND	ND	ND
シス-1,2-ジクロロエチレン	mg/l <0.04	ND	ND	ND
1,1,1-トリクロロエタン	mg/l <1	ND	ND	ND
1,1,2-トリクロロエタン	mg/l <0.006	ND	ND	ND
トリクロロエチレン	mg/l <0.03	ND	ND	ND
テトラクロロエチレン	mg/l <0.01	ND	ND	ND
1,3-ジクロロプロペン	mg/l <0.002	ND	ND	ND
チウラム	mg/l <0.006	ND	ND	ND
シマジン	mg/l <0.003	ND	ND	ND
チオベンカルブ	mg/l <0.02	ND	ND	ND
ベンゼン	mg/l <0.01	ND	ND	ND
セレン	mg/l <0.01	ND	ND	ND
フッ素	mg/l <0.8	0.1	ND	0.2
ホウ素	mg/l <1	0.95	1.1	0.62
ダイオキシン類 (含有量)	pg-TEQ/g <1000	3.1	1.9	1.3

※ND：定量下限値未満

## 6. おわりに

FGC-DM工法は、産業副産物であるフライアッシュの有効利用に伴う循環型社会への貢献、社会資本整備におけるコストダウンの特徴を有し、今後多方面で活用されることが期待される。また、本工法に関する設計・施工関連の技術情報を広く紹介するため、技術マニュアルを作成し、平成14年度中に発刊の予定である。

## 謝辞

平成5年度から平成13年度まで、本工法に関する技術検討会に委員長としてご尽力いただいた、高橋邦夫独立行政法人港湾空港技術研究所理事、ならびに奥村樹郎(株)ドラムエンジニアリング顧問、また委員としてご参加いただいた方々、電源開発(株)他関係者各位に深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) J. Asano, K. Ban, K. Azuma and K. Takahashi: Deep Mixing Method of Soil Stabilization Using Coal Ash, IS-TOKYO 96, The Second International Conference On Ground Improvement Geosystems, pp. 393~398, 1996.
- 2) 川真田桂, 東 健一, 高橋邦夫, 小笹和夫: 石炭灰を利用した深層混合処理工法により改良された地盤の水平地盤反力係数の評価方法について, 土木学会第56回年次学術講演会, III-B, pp. 398~399, 2001.