

◆ 報 文 ◆

# 低改良率セメントコラム工法の開発

古本一司\* 小橋秀俊\*\* 三木博史\*\*\* 恒岡伸幸\*\*\*\*

## 1. はじめに

近年わが国では、湿地帯や湾岸部の埋立地といった軟弱地盤層が厚く存在する箇所に、道路盛土などを建設せざるを得ないケースが増えている。また、世界各国においても、社会経済活動の進展とともにこうした軟弱地盤地帯に社会基盤施設を建設することが増えており、軟弱地盤対策コストも増大している。

土木研究所土質チームでは、こうした軟弱地盤地帯における安定・沈下対策のコスト縮減を可能にする技術として低改良率セメントコラム工法 (ALiCC工法) の開発に取り組んだ。開発にあたっては、インドネシア、スウェーデン、タイ、フランス各国の研究機関並びに民間各社との共同研究を実施した<sup>1)</sup>。

## 2. 低改良率セメントコラム工法の概要

### 2.1 従来工法の課題

従来から用いられている深層混合処理工法による軟弱地盤対策は、盛土の両サイドの、のり面下を集中的に改良する形式 (改良率50%以上) が主体であった (図-1)。これは、「盛土の安定を図る上でもっとも効果的なのは、のり面下の改良である」という円弧すべり安定計算からの結果に基づくものであった。また、盛土周辺への側方変形

の抑制という観点からも、長い間この改良形式による対策が主流となっていた。

しかしながら、この場合盛土載荷に伴って、改良の行われていない盛土下中央で大きな圧密沈下が生じる。これにより、のり面下の改良柱体は外側に押され、盛土周辺部に側方変形が起きることがあった。また、改良部分と無処理地盤との不同沈下によって段差が発生し、盛土内の亀裂発生なども無視できないこともあった。

### 2.2 低改良率セメントコラム工法の概要と考え方

#### 2.2.1 概要

低改良率セメントコラム工法は、軟弱地盤の圧密沈下軽減、盛土の安定確保を図るために、深層混合処理等により、盛土下に全面的にくまなく、

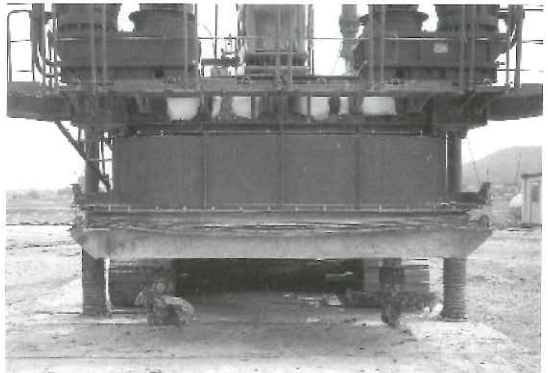


写真-1 攪拌機 (軸間距離2.5m)

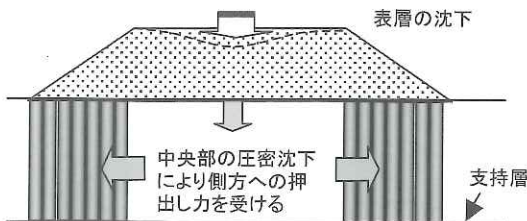


図-1 従来の深層混合処理工法と問題点



写真-2 施工後の様子

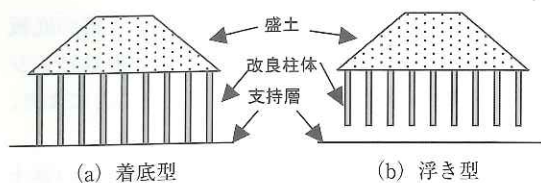


図-2 改良形式のイメージ

従来の深層混合処理工法に比べ低い改良率となるようセメント系の改良柱体を造成することを特徴とする工法である。(写真-1、2) なお、改良率とは、改良対象区域全体の面積に対する、改良柱体の杭頭部分の面積の割合をいう。低い改良率とはこの場合、10%~30%を想定している。

盛土下に全面的に改良柱体を配置することによって、従来工法において問題となっていた盛土下中央の圧密沈下の抑制を図っている。さらにこれにより、側方へ押し出そうとする力が低減され、結果として周辺への側方変形も抑制されることとなる。これが従来の改良形式とは異なる低改良率セメントコラム工法の特徴である。

改良方式には、改良柱体を支持基盤に着底する「着底型」と、着底しない「浮き型」の2つのタイプがある。(図-2)。ある程度の沈下が許容される場合は、浮き型とすることによるコスト低減が可能である。

### 2.2.2 低改良率セメントコラム工法の利点

ドレーン工法のような圧密放置期間が不要なため工期短縮が可能である。また、従来の深層混合処理工法に比べ改良率が小さいことから、低コスト化も期待できる。さらには、圧密による沈下量を低減することが可能なため、計画高さを確保するための盛土材料の節約も可能(従って、土砂運搬による交通環境、周辺環境への影響も低減することが可能)という利点を有している。

### 2.2.3 低改良率とすることの課題

低改良率セメントコラム工法では、改良率が従来の深層混合処理工法に比べ小さい、すなわち、改良柱体間の距離が大きいため、改良柱体の沈下と柱体間の無処理地盤の沈下との間に差(不同沈下)を生じる可能性がある。特に、盛土高さが小さい、あるいは改良柱体間隔が大きく、盛土高さが改良柱体間隔に比べ相対的に低くなる場合は、盛土材の押し抜きせん断破壊が発生する(図-3)おそれがある。

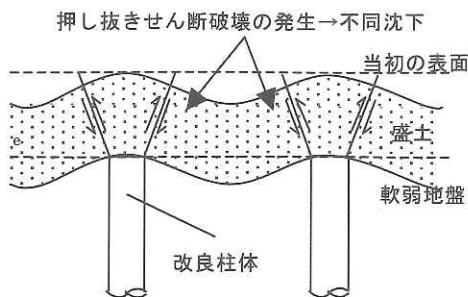


図-3 盛土中に発生する押し抜きせん断とそれに伴う不同沈下

無処理地盤の沈下量を算定するためには、作用する荷重を設定する必要があるが、従来設計で使用されていた応力分担比((改良柱体に作用する応力) / (無処理地盤に作用する応力)、10から20程度)に基づく値を用いると、低改良率とした場合には、改良柱体間の無処理地盤に発生する沈下量が大きくなり低改良率は困難と判断していた。

しかし、低改良率で施工した現場において計測した結果によると、実際の応力分担比は大きく、無処理地盤に作用する荷重は想定していた値よりも小さいことが分かってきた<sup>2)</sup>。

この原因として、無処理地盤が沈下することで改良柱体間においてアーチ効果が発生し、盛土荷重の大部分が改良柱体に分配されることが考えられた(図-4)ため、実験により検証した。

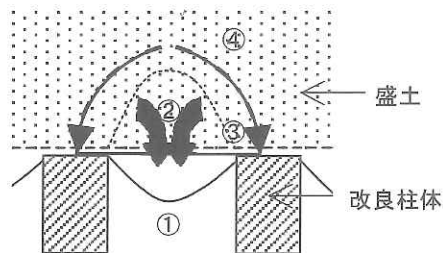


図-4 アーチ効果

- ①盛土荷重により無処理地盤及び改良柱体が沈下する。
- ②盛土材も無処理地盤及び改良柱体の沈下に追従して沈下する。
- ③無処理地盤の中央ほど沈下量が大きくなり、盛土材の中でアーチ状の構造が形成される。
- ④アーチの上に存在する盛土荷重はアーチに沿って、改良柱体上に作用する。



### 3. アーチ効果に関する模型実験

#### 3.1 模型実験の概要

2. で述べたように、本工法は、アーチ効果を的確に把握することが重要となる。そこで、アーチの大きさを求めるために行った模型実験の概要を以下に示す。

図-5に示すような、地盤沈下発生装置内に表-1に示す材料を用いて盛土模型を製作した。地盤沈下発生装置は、長さ14m×高さ4m×幅1mの大型土槽と、21個の油圧ジャッキに支持された鋼製

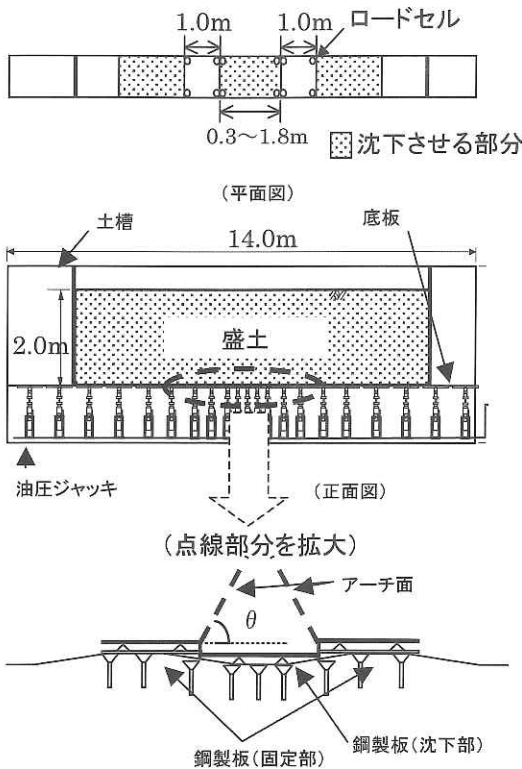


図-5 実験装置の概要

表-1 試料の土質特性

土粒子の密度		2.730g/cm <sup>3</sup>
含水比		3.0%
粒度構成	礫分	3.0%
	砂分	90.3%
	シルト分	3.6%
	粘土分	3.1%
最大乾燥密度		1.756g/cm <sup>3</sup>
最適含水比		14.8%
粘着力		0.02kN/m <sup>2</sup>
せん断抵抗角		39.4°

板から構成される。これらの鋼製板は土槽の底板を構成している。油圧ジャッキと鋼製板はヒンジ結合され、油圧ジャッキを上下させることにより、地盤沈下を再現することができる。

まず土槽内に、密度が締め度90%以上の盛土を作製するため、1層の厚さ20cmとし10層に分けて材料を敷き均し、転圧を行った。その後鋼製板を速度10mm/hで50mmまで下降させることにより不同沈下を発生させた。

実験ケースを表-2に示す。実験は、改良率（改良柱体間の距離）によるアーチ効果の違いを把握するため、鋼製板（沈下部）の長さを変化させて実施した。

#### 3.2 実験結果

各ケースにおいて、沈下部分と固定部分の間の盛土にアーチ面が発生した。実験により得られた応力分担比の変化を図-6に、アーチ面の角度 $\theta$ を表-3に示す。

各ケースとともに、沈下量がある一定値になるまでは応力分担比は急激に増加し、その後一定値に収束した。これは、沈下によりアーチ面が発達し、アーチ作用が大きくなるにつれて、この面に沿って、沈下部上の盛土荷重の一部が固定部に伝達され、沈下部に作用する鉛直荷重は軽減されたためと考えられる。

表-2 実験ケース

ケース	沈下部の鋼製板長さ (m)
1	0.3
2	0.8
3	1.3
4	1.8

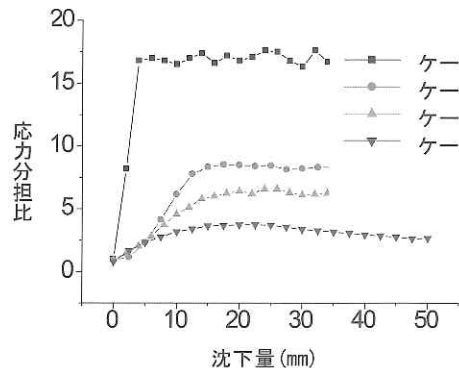


図-6 応力分担比の変化

表-3 アーチ面の角度と応力分担比

ケース	$\theta$ (°)	応力分担比
1	66	17.2
2	71	8.2
3	62	6.8
4	71	3.6

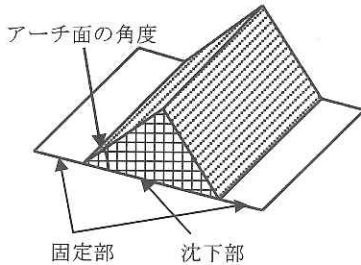


図-7 荷重分散モデル (実験の再現)

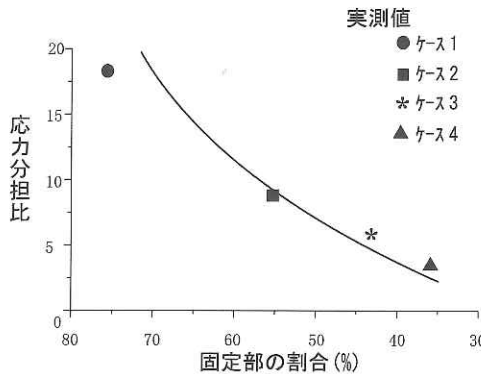


図-8 荷重分散モデル (実験の再現) と実測値の比較

この結果から、図-7に示すような荷重分散モデルを想定し、本モデルに基づき応力分担比を計算した (図-8)。図に示すように、計算結果と実測値は概ね一致したことから、盛土材のアーチ効果を期待できることが確認された。

#### 4. 設計の概要<sup>3)</sup>

以上の成果を踏まえ、次のような設計の手順を提案した (図-9)。

##### 4.1 すべり破壊に対する安定の検討

まず、すべり破壊に対する所要の安全率を確保するよう改良率、改良強度、改良柱体長さを設定する。安定の検討にあたっては、改良する領域を、改良柱体と無処理地盤との複合地盤 (平均強度) として評価する。

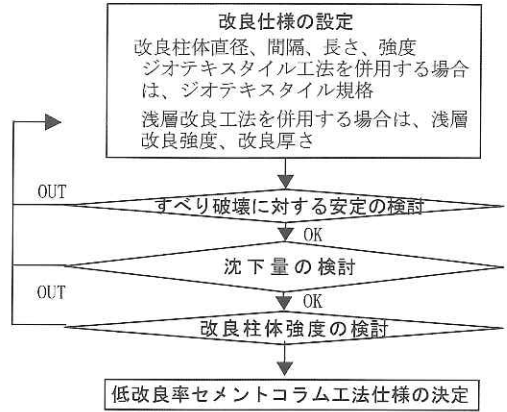


図-9 設計の手順

#### 4.2 沈下量の検討

##### 4.2.1 全沈下量

着底型の場合、複合地盤として全沈下量の検討を行い、許容沈下量以下となるよう改良率、改良強度、改良柱体長さを設定する。

浮き型の場合は、改良する領域の沈下量は複合地盤として、下部の無処理地盤の沈下量は盛土荷重を改良柱体下方に分散させて計算する。

##### 4.2.2 改良柱体と無処理地盤との不同沈下量

前述のアーチ効果を考慮して、沈下量の検討を行う。

まず無処理地盤の沈下量を求める必要があるが、その際、アーチ効果により無処理地盤に作用する盛土形状が、図-10に示すような山型となり、この部分以外の盛土荷重は改良柱体が負担すると考え沈下量を計算する。

この盛土の体積は以下の式により計算される。

$$V = \left\{ \frac{\lambda - d}{2} \cdot \lambda^2 - \frac{\pi(\lambda^3 - d^3)}{24} + \frac{(4 - \pi) \cdot (\sqrt{2} - 1)}{24} \cdot \lambda^3 \right\} \tan \theta$$

$\lambda$  : 改良柱体中心間距離

$d$  : 改良柱体直径

$\theta$  : アーチ面の角度

改良柱体の沈下量は、図-10に示される部分以外の盛土荷重が全て作用するとして、改良柱体を弾性体とみなし算出する。これらの結果を基に不同沈下量を算出する。

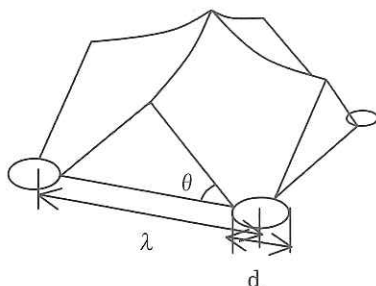


図-10 改良柱体間荷重モデル<sup>2)</sup>に加筆修正

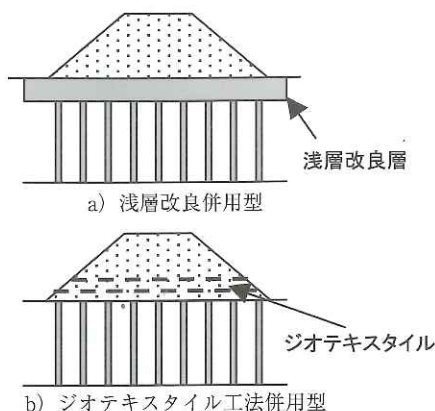


図-11 浅層改良工法、ジオテキスタイル工法の組み合わせのイメージ

#### 4.3 改良柱体強度の検討

盛土材のアーチ効果による応力分散の考え方に基いて、改良柱体にかかる応力を計算し、安全性を照査する。

#### 4.4 補助工法の適用

安定・沈下・改良柱体強度の検討を行った結果、許容値を満足しない場合には、改良柱体の間隔は、盛土高さよりも小さく設定する、もしくはジオテキスタイル工法や浅層改良工法の併用を検討する(図-11)。

ジオテキスタイル工法を適用する場合は、ジオテキスタイルに発生する応力が許容値内に収まるようにジオテキスタイルの仕様(強度、敷設枚数)を決定する。

浅層改良工法を適用する場合は、浅層改良強度および厚さを、盛土の安定性および、浅層改良層の押し抜きせん断破壊に対して安全を確保するように設定する。また、基礎地盤のせん断強度が非常に小さい場合には、浅層改良層の曲げ応力を照査する。

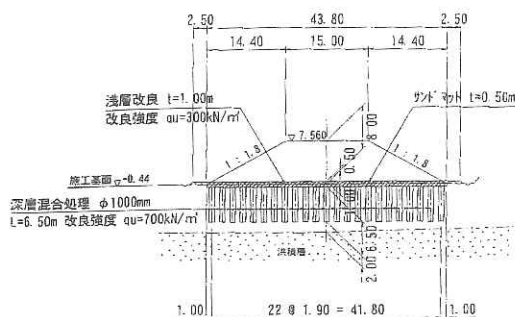


図-12 施工概要

### 5. 試験施工事例<sup>4)</sup>

有明海沿岸道路は、非常に軟弱な粘性土層の上に計画され、その厚さは10~20m程度、深いところでは約50mにも及んでいる。そこで、新工法・新技術を対象に、その効果を試験盛土により確認することとなった。

当該箇所では、厚さ10m程度の軟弱地盤上に、浮き型のセメントコラム工法(浅層改良併用)を適用し、高さ8mの盛土を構築した(図-12)。

3年間の沈下量が10cm以下、改良柱体と無処理地盤との不同沈下量が5cm以下となるように設計した。改良柱体の長さは6.5m、直径は1m、設計基準強度0.7MN/m<sup>2</sup>、改良面積率21.7%であり、浅層改良層の厚さは1m、設計基準強度は0.3MN/m<sup>2</sup>であった。

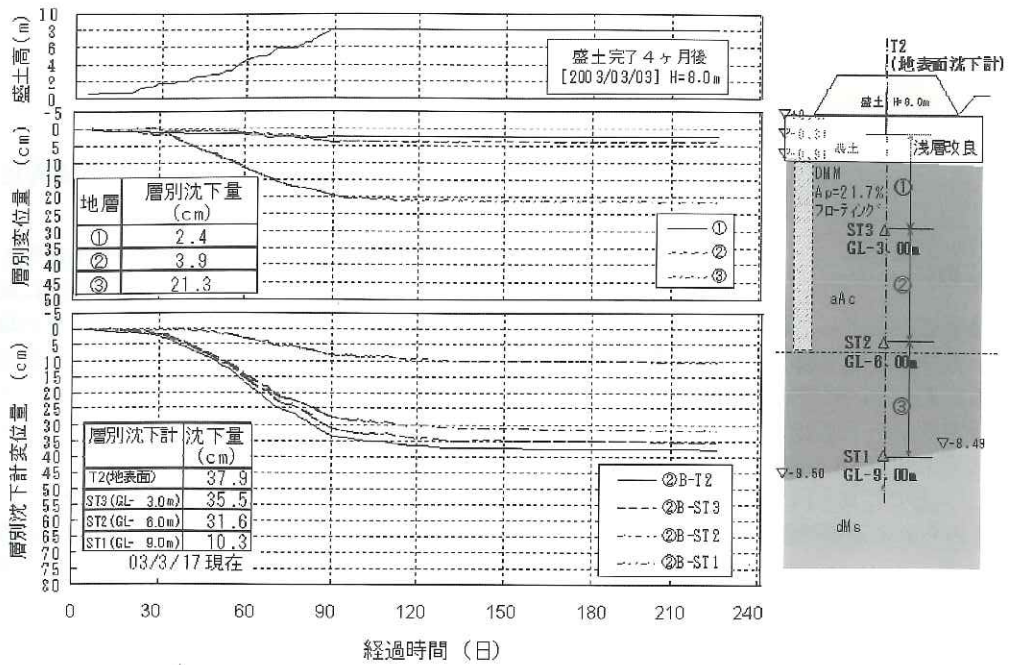
図-13に沈下量計測結果を示す。図に示すように、改良領域の沈下量は、6cm程度であり、盛土完成直後にはほぼ一定の値となっている。また、改良領域下部の無処理層の沈下量は21cm程度であり、盛土完成後の沈下量は小さいことが確認された。

一方、近傍において、軟弱地盤対策を実施しないで盛土を行った箇所では、総沈下量が120cmを超えており、また、のり尻付近では、100cm程度の沈下が生じていた。これらのことから、低改良率セメントコラム工法による沈下量低減・制御効果が十分発揮されたといえる。

### 6. まとめ

軟弱地盤対策工法のコスト縮減を目的として、低改良率セメントコラム工法に着目し、模型実験ならびに試験施工等を実施し、その結果、改良柱体間に発生するアーチ効果の存在を把握すること





ができた。さらにこれらの結果を元に設計法の提案を行った<sup>5)</sup>。今後、広く軟弱地盤対策に使用されることを切望する。

最後に、上記研究の実施にあたり、多大なる御支援、御協力を頂いた数多くの関係者の皆様に、この場を借りて深く感謝致します。

### 参考文献

- 1) 三木博史：タイにおける軟弱地盤対策に関する研究協力、土木技術資料41-10, pp.40-45、平成11年10月
- 2) 三木博史・山田哲也・芳賀 直：深層混合処理工法の改良率と応力分担比に関する実験的考察、第32回地盤工学研究発表会, pp.2401-2402、平成9年7月
- 3) 三木博史・野津光夫・竹内秀克：低改良率深層混合

- 4) 井上靖武・三木博史・落合英俊・増田博行：浮き型低改良率改良体 (F-低改良率セメントコラム) 工法の道路盛土での改良効果、第48回地盤工学シンポジウム, pp.177-184、平成15年11月
- 5) 土木研究所共同研究報告書第322号—低改良率セメントコラム工法マニュアル (案) 一、平成17年10月

古本一司\*



独立行政法人土木研究所つくば中央研究所材料地盤研究グループ土質チーム主任研究員  
Kazushi FURUMOTO

小橋秀俊\*\*



独立行政法人土木研究所つくば中央研究所材料地盤研究グループ土質チーム首席研究員、工博  
Dr. Hidetoshi KOHASHI

三木博史\*\*\*



(前 独立行政法人土木研究所つくば中央研究所技術推進本部長)、工博  
Dr. Hiroshi MIKI

恒岡伸幸\*\*\*\*



JICA 長期専門家 (道路政策)、工博 (前 国土技術政策総合研究所道路研究部道路研究官)  
Dr. Nobuyuki TSUNEOKA