

気泡掘削による深層混合処理工法（AWARD-Demi 工法）の開発

戸田建設(株)	正会員	○下坂 賢二
早稲田大学	フェロー会員	赤木 寛一
(有)マグマ	正会員	近藤 義正
戸田建設(株)	正会員	浅野 均
(株)安藤・間	正会員	三反畑 勇
前田建設工業(株)	正会員	安井 利彰
太洋基礎工業(株)	正会員	俵 豊光

1. はじめに

東日本大震災以降、液状化対策などの基礎地盤強化の重要性が増している。深層地盤改良工法は、原位置土に固化材スラリーを攪拌混合して、比較的安価に所要強度の地盤に改質する確実性の高い工法であるため、基礎地盤分野の工事において多目的に適用されている。しかしながら、地盤掘削時の地盤流動性を確保するために、多量の水（W/C の大きい固化材スラリー）を添加する必要があるため、余剰汚泥量の増加要因となり、環境負荷及びコスト低減の観点から、その抑制が大きな課題となっていた。

今回開発した深層地盤改良工法「AWARD-Demi（AWARD-Deep-mixing）工法」は、気泡掘削工法を適用した深層地盤改良技術であり、地盤を掘削する際に微細な気泡を添加することで掘削土の流動性と遮水性が向上し、従来工法に比べて加水量を低減できることから固化材量の低減や余剰汚泥量の削減の効果が期待できる。本稿では、工法の概要および特長を述べるとともに、有効性検証のために実施したフィールド試験事例を紹介する。なお、本工法は、早稲田大学、マグマ、戸田建設、前田建設工業、安藤ハザマ、太洋基礎工業の共同研究成果であり、コストパフォーマンスに優れた環境配慮型の地盤改良技術である。

2. 気泡掘削工法

2.1 気泡混合土

気泡混合土とは、気泡が添加された掘削土であり、以下の性質がある。

- ・透水性が低下する。
- ・流動性が向上する。

- ・単位体積重量が減少する。

気泡掘削工法は、写真1に示すような微細な気泡（シェービングクリーム状）を掘削時に注入し地盤と混合攪拌することで写真2のような気泡混合土を形成して掘削する技術である。気泡は、生分解性の合成界面活性剤系の起泡剤を使用し、水で20倍希釈して自動発泡機で25倍に発泡させたもの（密度0.04g/cm³、気泡径200μm）を標準としている。



写真1 気泡



写真2 気泡混合土

地盤と攪拌混合された気泡混合土を用いた気泡掘削工法は、以下の特長を有する。

①溝壁安定性

微細な独立気泡が溝壁周辺の原地盤の間隙部分に入り込むことで、不透水層を形成し、掘削時の溝壁安定性を確保できる。

②気泡によるベアリング効果

気泡のベアリング効果により、少ない加水量でも高い流動性状が確保でき、攪拌翼への掘削土付着が少なく、掘削回転トルクが低減する。

③消泡による減量化

気泡混合土は、消泡剤を添加することで気泡が消泡され、余剰排泥量を減量化できる。

キーワード 地盤改良、気泡掘削、発生汚泥量低減、環境負荷低減、工費低減

連絡先 〒104-8388 東京都中央区京橋 1-7-1 戸田建設(株) アーバンルネッサンス部 TEL 03-3535-1602

気泡安定液の溝壁安定性

メカニズム：微細な独立気泡が溝壁周辺の原地盤の土粒子間隙部分に入り込むことで不透水層を形成

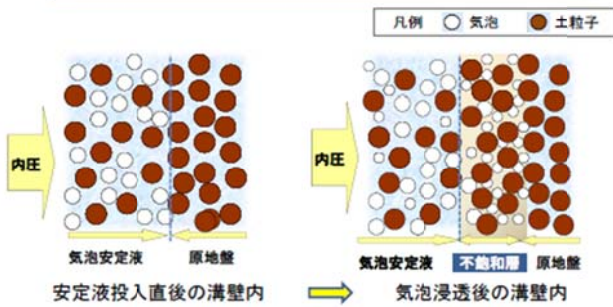


図1 溝壁安定性の模式図

気泡のベアリング効果

ベアリング効果により、含水比が小さくても土の流動性を確保

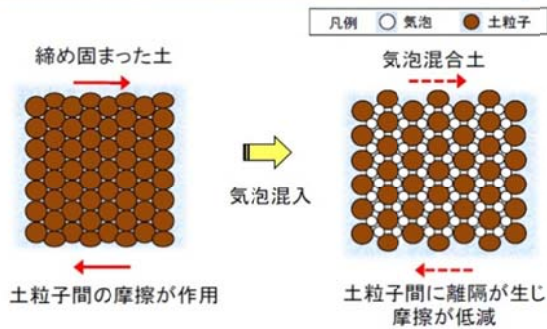


図2 気泡のベアリング効果の模式図

消泡による減量化

気泡を消泡させることで、気泡体積分の減量化が図れる

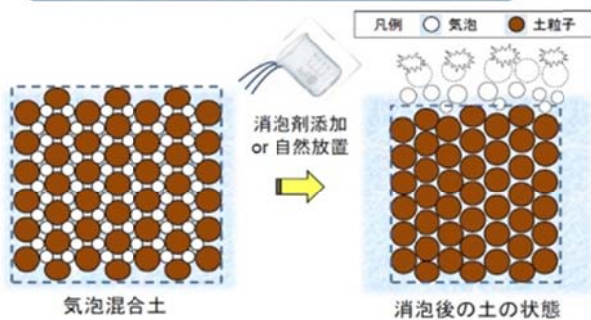


図3 消泡による減量化の模式図

2.2 気泡掘削工法を適用した地盤掘削技術

気泡掘削工法を適用した地盤掘削技術として、AWARD-Trend 工法および AWARD-Ccw 工法が実用化されている。

(1) AWARD-Trend 工法

AWARD-Trend(気泡を用いた等厚式ソイルセメント地中連続壁) 工法は、等厚式ソイルセメント地中連続壁

工法において、従来のベントナイトの添加に代えて、気泡を用い気泡混合土を形成した後、消泡剤を混入したセメントスラリーを添加・攪拌し、等厚のシームレスなソイルセメント壁を構築する工法である。遮水壁となる他、H鋼などの芯材やプレキャスト部材を建てこむことにより、土留め壁全般に適用できる技術である。多くの実績を有し、従来のベントナイト工法と比較して、発生汚泥量を60～80%低減できることが確認されている。

(2) AWARD-Ccw 工法

AWARD-Ccw 工法（気泡を用いた柱列式ソイルセメント地中連続壁工法）は、掘削ビットで掘削時に気泡を添加しながら気泡混合土を形成し、引上げ時にセメントスラリーと消泡剤を添加し、消泡しながらセメントスラリー混合土を形成し、柱列式のソイルセメント壁を構築する工法である。



写真3 AWARD-Trend 工法



写真4 AWARD-Ccw 工法

3. AWARD-Demi 工法の概要

3.1 工法の概要

従来の深層地盤改良工法（図 4）は、貫入掘削時に水と固化材（固化材スラリー）を添加しながら掘削し、比較的多量の水（W/C の大きい固化材スラリー）を添加することにより、混合攪拌性を向上させ掘削土と固化材との混合攪拌を行う。地盤に多量の水を添加するため、固化材スラリー量も増大し、多量の余剰汚泥を排出することになる。また、地上に排出される余剰汚泥の中には固化材スラリーが含まれているため、実際に地盤内に残る固化材量は少なくなり、さらに多量に加水されているため、所要の改良強度を得るには多くの固化材を添加する必要がある。

AWARD-Demi 工法（図 5）は、まず気泡を吐出させながら地山の貫入掘削を行い、孔壁安定性を確保しながら気泡のベアリング効果により混合攪拌性を向上させた気泡混合土を形成する。攪拌翼の引抜き時には改良材（消泡剤を添加した固化材スラリー）を添加・攪拌し、気泡を消泡しながら地山と固化材スラリーとの混練りを行うことで余剰汚泥量低減を図り改良体を造成する。そのため、従来工法では余剰汚泥の中に固化材の一部が混入するのに対し、本工法では、貫入時に造成された気泡混合土に比べて固化材スラリーの比重が大きいことから、引上げ時に吐出する固化材スラリーは吐出口位置より上には移動しにくくほぼ全量が改良範囲に残り、従来工法より固化材量を低減しても所要の改良強度を得ることができる。表 1 に固化材スラリーのみを用いる従来の深層混合処理工法と AWARD-Demi 工法との比較を示す。

なお、本工法は、従来の深層混合処理工法と同様、図 6 に示す各種構造物の基礎地盤の改良などの様々な用途に適用できるほか、図 7 のような柱状形式、ブロック状形式など所要強度に応じて改良形式を選択できる。

表 1 工法比較

項 目	従来工法	AWARD-Demi工法
混合攪拌性	多量の加水	気泡＋少量の水（気泡は消泡）
固化材スラリー W/C	高W/C たとえば100%	低W/C たとえば60%
単位固化材量	多 たとえば400kg/m ³	少 たとえば300kg/m ³
固化材スラリー量	532 ℓ/m ³	279 ℓ/m ³
汚泥量	多量	少量

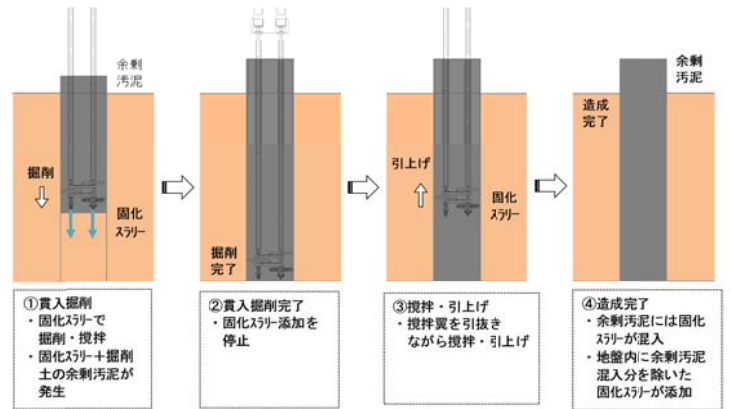


図 4 従来工法（貫入時吐出方式）の施工手順図

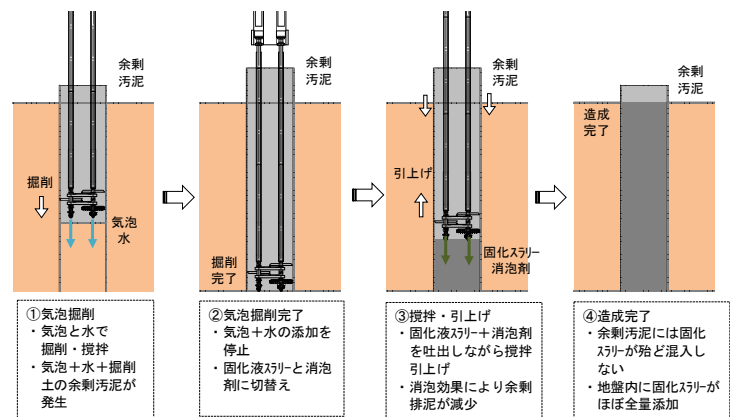


図 5 AWARD-Demi 工法（引抜時吐出方式）の施工手順図

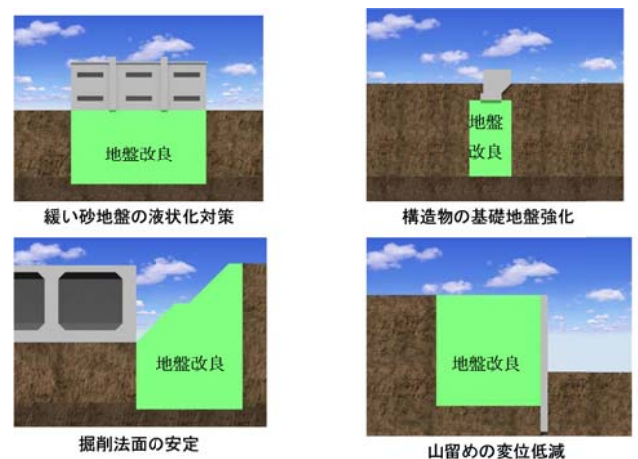


図 6 用途の一例

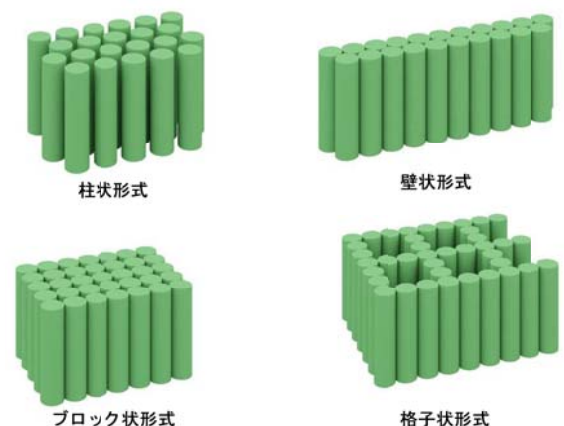


図 7 改良形式

3.2 工法の特長

本工法は、以下の特長を有する。

(1) 固化材量の低減

気泡添加により、気泡が土粒子間に入り込みベアリング効果を発揮することで、少量の加水で流動性を確保できる。このため、注入する固化材スラリーの水固化材比（W/C）を低減でき、引抜時に固化材スラリーを吐出することを基本としているため、固化材の添加効率が向上し固化材量の低減が図れる。

(2) 余剰汚泥量の低減

気泡により流動性が確保された気泡混合土に、消泡剤が添加された固化材スラリーを添加し混合攪拌することにより気泡は消泡される。そのため、掘削時に添加した気泡は、最終的な余剰汚泥を増やす要因とならず、固化材量が低減した分、余剰汚泥量が低減できる。

(3) 施工効率の向上

気泡の添加により、攪拌翼への地山の付着が抑制でき、改良機の掘削回転トルクが低減するため、高速回転施工が実現可能となり、施工効率の向上が期待できる。

(4) 改良体品質の向上

気泡の添加により流動性が向上するため、気泡混合土と固化材スラリーが均質に混合・攪拌でき、ばらつきが少ない改良体が造成できる。

(5) 周辺環境への負荷低減

従来工法に比べて地盤に注入する固化材スラリーや水の量が少ないため、周辺地盤変状が小さく、固化材使用量、排泥処理量の低減により運搬等による CO₂ 排出量の削減が可能となる。

(6) 工事費の低減

固化材量費の低減、余剰汚泥処分費の低減等により、工事費の低減が図れる。

4. フィールド試験

4.1 試験概要

本工法の有効性を検証するために、実現場でのフィールド試験を実施した。試験ケースは、気泡を添加しない従来工法を 1 ケース、気泡を添加した AWARD-Demi 工法を 9 ケース実施し、気泡量、水固化材比、固化材量、掘削引き上げ時のスラリー添加比率、攪拌翼回転数等をパラメータとして、従来ケースと比較することで工法の有効性を確認した。

試験場所は、N 値が概ね 10 以下の礫混りの粘性土地盤で地下水位は GL-6.7m であった。図 8 に地盤条件を示す。施工には、複合相対攪拌翼（図 9）による深層混合処理機を用い、改良径 1.6m、改良長 10m の改良体を造成し、消泡性などの施工性確認のために 1 ケースのみ改良長を 19m とした。

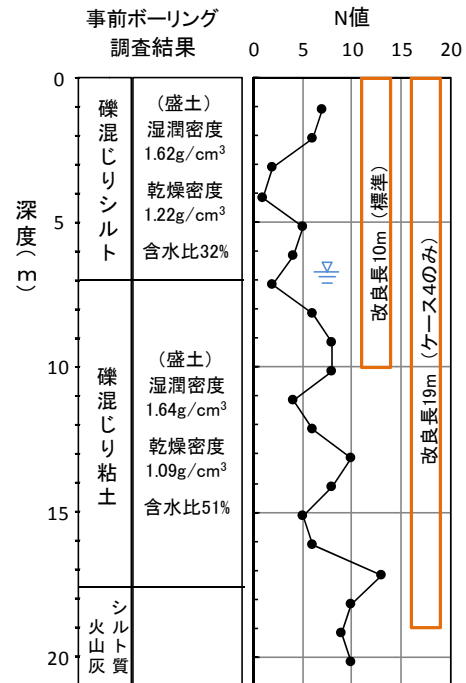


図 8 地盤条件と改良長

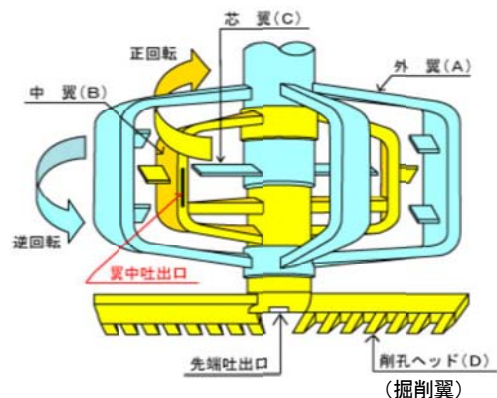


図 9 複合相対攪拌翼



写真 5 攪拌翼からの気泡吐出状況

4.2 試験ケース

地盤改良の設計圧縮強度は、設計圧縮強度 $\sigma_{28} = 1000\text{kN/m}^2$ とし、室内配合試験目標強度 $\sigma_{28} = 3000\text{kN/m}^2$ に基づき配合試験を実施し、気泡無添加の従来工法(ケース 1)は、固化材量 300kg/m^3 , $W/C=100\%$ とした。一方、気泡添加の AWARD-Demi 工法は、固化材量 246kg/m^3 , $W/C=60\%$ で従来工法と同等の強度が期待できた、また、施工時の掘削速度等は、従来工法における標準的な仕様(掘削速度 0.5m/min , 引上げ攪拌速度 1.0m/min , 掘削時内軸回転数 13rpm , 引上げ時内軸回転数 26rpm)を基本とした。

施工は、掘削時に先端吐出口から気泡とセメントスラリーを注入し、翼中吐出口からはセメントスラリーのみを注入した。そして、引上げ時には、翼中吐出口だけを使用して消泡材を添加したセメントスラリーを注入した、なお、消泡材が注入される翼中吐出口は、先端から 1.3m 上にある。そのため、改良最深部の 1.3m 区間では気泡を吐出せずに、セメントスラリーのみによるターニング攪拌で先端処理を行った。AWARD-Demi 工法の施工サイクルタイムの一例を図 10 に示す。

気泡添加の試験ケースは、掘削時・引上げ攪拌時の固化材スラリー添加比率(5:5)、気泡添加率 $Q=0.825\%$ (2140m^3), 掘削時内軸回転数 13rpm を基本仕様とし、これらの項目をパラメータとして、試験ケースを選定した。表 2 に試験ケース一覧を示す。

なお、 $W/C=40\%$ のケース 9, 10 には、流動性確保のために固化材量 $\times 0.5\%$ の流動化剤を添加した、

4.3 試験結果

AWARD-Demi 工法のケース 2~5 については施工性確認を主目的に、気泡添加量などを変化させてケース 6~9 の施工仕様を設定するための予備試験とし、ウェットサンプリング(未固化状態での試料採取)からソイルセメントの比重、含水比、ベーンせん断強度など基礎データを得た。ケース 6~9 は、施工後にオールコアボーリングを実施し、改良体品質(一軸圧縮強度など)を確認した。

(1) 改良体の圧縮強度

オールコアボーリングをケース 1, 6~9 の 5 ケース実施し、コアサンプルを 1 供試体/ 0.5m (改良長 10m , 計 20 供試体/1 ケース) 採取・整形し、一軸圧縮試験を実施した。

図 11 に各ケースのセメント量と一軸圧縮強度の深度分布, 図 12 に各ケースの一軸圧縮強度の最大, 最小, 平均値及び変動係数を示す。

ケース 6~9 は、固化材量が従来工法ケース 1 の約 80% 程度と少ない量にもかかわらず、圧縮強度がいずれも高い値を示し、バラツキを示す変動係数は小さい値を示している。この結果より、気泡を添加することで、低 W/C でも良好な混合攪拌性を確保し、固化材量を 20% 程度低減しても、所要の強度を確保できることを確認した。

表 2 フィールド試験ケース一覧

施工方法	気泡掘削による深層混合処理工法(AWARD-Demi工法)									
ケースNo.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
特徴など	気泡なし	気泡少	(標準的)	気泡多	セメント少	スラリー-3:7	スラリー-7:3	高速回転	低W/C スラリー-3:7	低W/C セメント少
基本仕様	改良径(m)	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6
	改良長(m)	10	10	10	19	10	10	10	10	10
	セメント量C(kg/m³) [ケース1に対する比]	300	246	246	246	231	246	246	246	231
	水セメント比W/C(%)	100	60	60	60	60	60	60	40	40
	流動化剤(kg/m³)	—	—	—	—	—	—	—	1.155	1.155
掘削時	セメントスラリー量(Q/m³) [ケース1に対する比]	399	229	229	229	215	229	229	169	169
	セメントスラリー注入比率 (掘削時:引上げ時)	7.5:2.5	5:5	5:5	5:5	5:5	3:7	7:3	5:5	3:7
	気泡添加率(%)	—	0.5	0.825	1.15	0.825	0.825	0.825	0.825	0.825
	気泡量(Q/m³)	—	130	214	298	214	214	214	214	214
	セメントスラリー量(Q/m³)	299	114.5	114.5	114.5	114.5	68.7	160.3	114.5	68.7
引上げ時	掘削速度(m/min)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
	回転数(rpm)	内軸 13	13	13	13	13	13	13	26	13
		外軸 4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	9.6	4.8
	セメントスラリー量(Q/m³)	100	114.5	114.5	114.5	114.5	160.3	68.7	114.5	160.3
	消泡剤希釈液量(kg/m³)	—	2.60	4.28	5.97	4.28	4.28	4.28	4.28	4.28
オールコアボーリング	掘削速度(m/min)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	回転数(rpm)	内軸 26	26	26	26	26	26	26	26	26
		外軸 9.6	9.6	9.6	9.6	9.6	9.6	9.6	9.6	9.6

注) 数値に網掛けしているところが、試験パラメータとしてAWARD-Demi工法の条件を変化させた部分である。

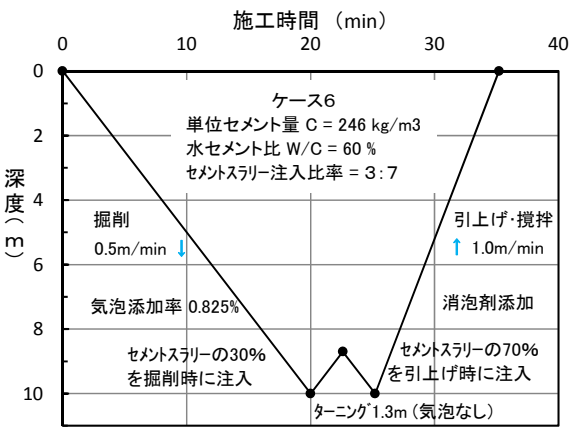


図 10 施工サイクルタイム

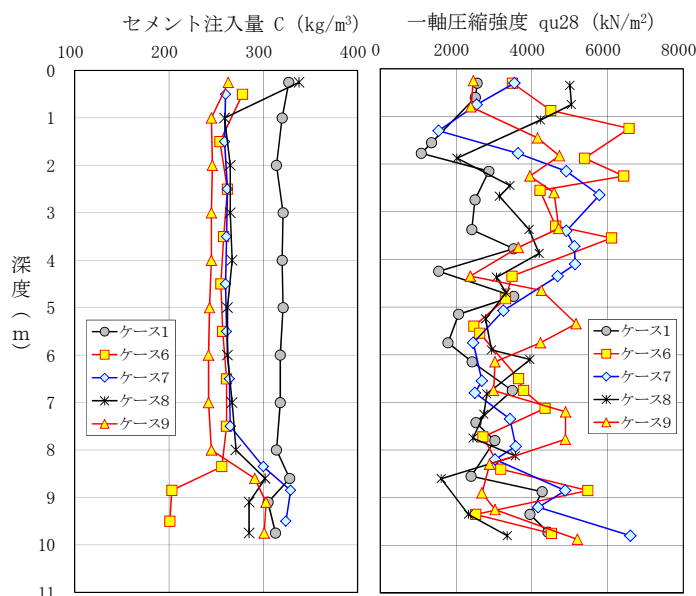


図 11 セメント注入量と一軸圧縮強度の深度分布

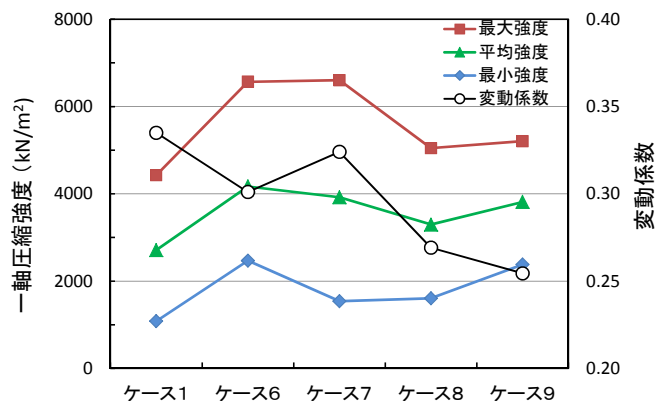


図 12 一軸圧縮強度と変動係数

4.4 余剰汚泥発生量

改良施工中、地上に排出した盛上り土をバックホーにて集積・整形して、各ケースにおける盛上り土量（余剰汚泥量）を計測した。

図 13 は、余剰土発生率（＝余剰汚泥量/改良体積）を各ケースで示したものである。従来工法ケース 1 に比べて、ケース 6～9 は、排出される汚泥量が概ね半分以下となっている。ケース 1（W/C=100%, C=300kg/m³, スラリー量 3990/m³）に対して、ケース 6～9（W/C=40, 60, C=231, 246kg/m³, スラリー量 168, 2290/m³）の添加スラリー量が概ね半分であった効果であり、本工法における余剰汚泥量低減効果が確認できた。

4.5 コスト試算

図 14 は、ケースの 6～9 の従来工法ケース 1 に対するコスト削減率を示したものである。AWARD-Demi 工法適用時には、起泡剤や消泡剤の薬剤費と気泡プラント等の追加設備費がコスト増の要因となり、固化材量や産廃汚泥処分量の低減がコスト減の要因となる。余剰

汚泥の産廃処分費を考慮しない場合は、2～3%のコスト削減、産廃処分費を考慮した場合には、約 20%のコスト削減が期待できる。

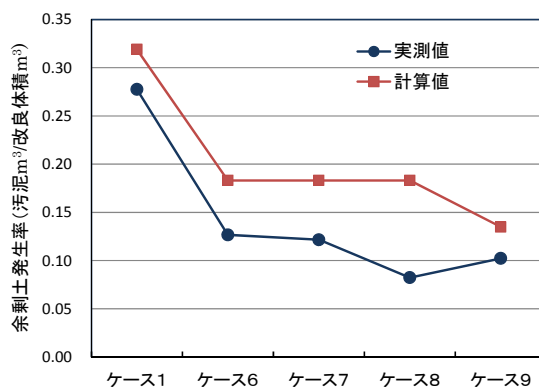


図 13 余剰汚泥発生率

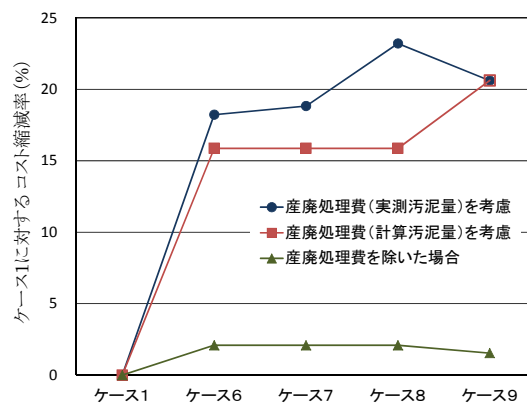


図 14 コスト試算結果

4.6 試験結果まとめ

試験結果より、本工法の以下の特長を実証できた。

(1) 固化材量及び余剰汚泥量の低減

気泡を添加することで、セメントスラリーの W/C 及び添加量を低減しても混合攪拌性、所要強度を確保でき、セメント量及び余剰汚泥量の低減が図れる。

(2) 改良体品質の向上

流動性の高い気泡混合土によりセメントスラリーとの混合攪拌性が良く、従来工法に比べてバラツキの少ない改良体を造成できる。

(3) 工事費の低減

固化材量、汚泥量の低減から、従来工法と比較して、約 20%程度のコスト削減が期待できる。

5. おわりに

本工法は、環境負荷低減とコスト低減が図れる工法であり、様々な施工条件での検証を蓄積し、工法の普及促進を図っていく所存である。