

高圧噴射攪拌による高速低変位施工を実現した SDM 工法（高速低変位深層混合処理工法）

鈴木孝一・西尾 経・松岡大介

SDM 工法は、機械攪拌と超高圧噴射攪拌を併用したハイブリッドシステムの地盤改良工法である。機械攪拌翼先端部から超高圧ジェット噴射により攪拌することで従来深層混合処理工法に比べ、大口径の改良体が高速で、かつ大量な処理施工が可能であり工期の大幅な短縮が図れる。また、改良時には攪拌軸に装着したオーガースクリュにより、排出土の制御ができ、低変位施工が可能である。本工法は、国土交通省新技術活用システム（NETIS）に登録（KT-980134-V）されており、活用効果評価において技術の優位性、安定性が確認され、有用な新技術の活用促進として設計比較対象技術に指定されている。

キーワード：地盤改良、深層混合処理工法、機械攪拌工法、高圧噴射攪拌工法、低変位、密着施工、高速施工

1. はじめに

近年、地盤改良工法による河川護岸・既設岸壁の耐震補強等において既設構造物に近接した施工や、市街地内の再開発事業等における掘削を伴う都市土木では、沖積粘性土地盤の開削工事等の土留めの安定、底盤改良による受働土圧の増加等を目的とし、地盤改良工法が用いられる場合が多い。しかし、このような都市土木の地盤改良施工では、一連の工程で山留め等との一体化を図れることや既設構造物や周辺地盤への変位等の影響が少ないことなど施工環境に配慮した施工方法が求められている。

SDM 工法では大口径な改良体を造成しながら、既設物との密着施工、改良体の一体化、また、改良時には地盤変位の抑制を図ることが可能な特許工法である。

本稿では、低変位施工と機械攪拌高圧噴射攪拌機構の両面を有する、ハイブリッドな改良方式で環境に配慮した SDM 工法の技術開発概要と施工システムについて報告する。

2. SDM 工法の概要

(1) 施工システムとその特徴

SDM 工法（Super Deep Jetmixing Method）は、機械攪拌と超高圧噴射攪拌を併用した複合技術で構成された地盤改良工法¹⁾である。写真—1 に示すよう

に、三点支持式杭打機をベースマシンとし、二軸式機械攪拌翼先端部から超高圧ジェットを噴射攪拌することで、従来深層混合攪拌工法に比べ、大口径の改良体が得られ、1日当たりの施工量が大量に処理でき、高速施工が可能で工期の大幅な短縮が図れる。改良時には攪拌軸に装着したオーガースクリュにより、排出土の制御ができ低変位施工が可能である。また、本工法では改良体の外周部が超高圧ジェット噴流による攪拌混合のため、基礎杭や山留め壁との密着施工、改良体



写真—1 SDM 工法施工機械と高圧水噴射状況

相互のラップ施工による一体化が図れる。山留め掘削の補助として適用される先行地中梁の造成と土留めとの一体化および受働土圧の増加を目的とした山留めとの一体化など一連の工程により施工が可能である。

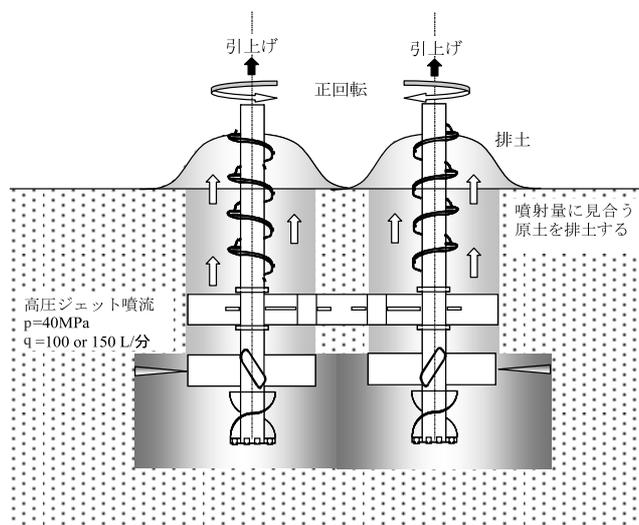
一般的にスラリー攪拌工法では、地中内にスラリー状の液体を混入させるため、地中変位が生じる場合が多い。本工法では変位抑制方法として、改良時に攪拌軸に装備したオーガスクリュの回転方向の制御により、固化材スラリー混入量に見合う量の土砂を排出するため、低変位な施工が可能である。また、その排出土は原土のみで固化材の混入はほとんどないことから、現場内での再利用も可能である。さらに環境面では、エア噴射を伴う高圧噴射工法と異なり、発生土に固化材スラリーの混入がほとんどないため、河川、湖沼等の水質汚濁の影響が少なく、水中内でも同様に低変位および密着施工等の目的で適用されている。

(2) 工法の原理

(a) 攪拌メカニズム

本工法の攪拌混合メカニズムは、機械攪拌翼の噴射攪拌装置の先端部から地盤中に固化材スラリーを超高圧ジェット噴射させ、切削破壊混合しながら所定の改良径を造成し、均一に攪拌混合する。

機械攪拌翼に組み込まれた噴射攪拌装置には、超高圧ジェット噴流体をよりシャープな線状噴流の形態で強力な切削性能を持たせている。装置内は地盤の切削距離をさらに延伸させる目的から、精密に内面加工を施した長身の円管部の整流域および噴流ノズルの先端口までの縮流部が円滑整形されている。



図一1 SDM工法メカニズム概要図

(b) 複合攪拌混合

機械攪拌部と超高圧噴射攪拌部とのハイブリッド化により、まず噴射攪拌装置から圧力 $p = 40 \text{ MPa}$ 、吐出量毎分 $q = 100 \sim 150 \text{ l}$ の超高圧ジェット噴流により地盤を切削破壊しながら改良体を造成する。次に切削混合攪拌され乱された混合土は、噴射攪拌装置の背面に瞬時に移動するとともに、さらに機械攪拌翼との攪拌混合が複合的に攪拌混合され均一な改良が行われる。図一1にSDM工法の攪拌メカニズムの概要図を示す。

(c) 施工時の地盤変位の抑制システム

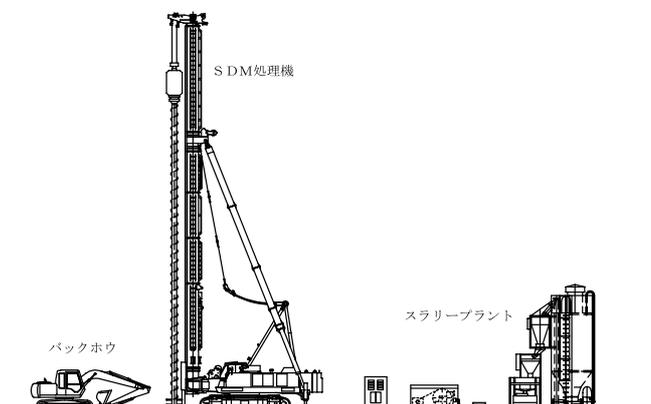
排出土量の制御は、オーガスクリュの回転の正回転と逆回転を施工途中で組み合わせることで、改良と同時に固化材スラリー混入量に見合う量の土砂を制御しながら排出させることができ、変位の抑制が容易に可能である。高圧噴射攪拌機構が主体的なため、攪拌軸のオーガスクリュを改良途中で排出土量を確認しながら正・逆回転させるなど機械攪拌工法では難しいが、本工法では精度の高い排土制御が可能である。

(3) 機械構成

本工法の施工機械の構成は、表一1に示すようにSDM処理機側および超高圧ポンプが設置されるプラ

表一1 施工機械構成

機 械 名	仕 様
SDM 処理機	SDM 駆動装置、耐圧 40 MPa 施工管理装置
SDM オーガスクリュ	特殊オーガスクリュ × 2 軸 SDM オーガヘッド $\phi 1.0 \text{ m} \times 2$ 軸 軸間長 1.4 m ~ 2.0 m
超高圧大容量ポンプ	吐出圧力 $p 40 \text{ MPa}$ 吐出量 $q 100 \sim 150 \text{ l/分}$
スラリープラント	処理能力 $20 \text{ m}^3/\text{h}$
発動発電機	550 kVA, 450 kVA, 75 kVA
バックホウ	0.6 m ³ , 排出ガス対策型



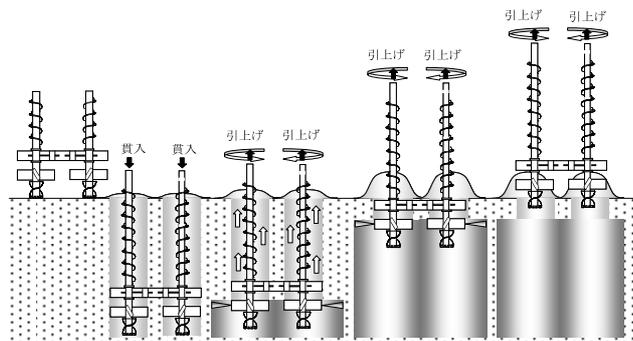
図一2 SDM工法施工機械図

ント側に大別され、**図—2**に機械構成図を示す。SDM 処理機では三点支持式杭打機を用い、SDM 駆動装置は二軸式アースオーガで超高压耐圧化を施している。

プラント側では、固化材をスラリー状に調製し、超高压ポンプを介し、攪拌軸先端の噴射攪拌装置へ圧送する。また、施工管理装置は、施工に関するデータをプラント側と SDM 処理機側から検出し、同時に監視し施工管理装置に送信して、自動的に記録される。

(4) 施工手順と改良管理方法

本工法の施工手順を**図—3**に示す。施工方法として、SDM 攪拌翼を所定深度まで定速度で貫入する。このとき、変位抑制のために貫入する攪拌装置容積分の土砂を同時に排出する。改良時において、連続的に引上げながら回転する方法では、高压ジェット噴流体は噴射攪拌装置が精密になるほどシャープさが保たれる反面、噴射切削幅が狭いため、同一位置の切削破壊が行われず、改良側面がスパイラル状となりやすい。本工法では、新たに開発した精密で高精度に操作管理が可能なステップ巻上げ装置の機能により、正確なステップ間隔と時間管理を行いながら、ステップ方式で改良する。超高压ジェット噴流を一定のステップ時間を同一位置で繰り返し切削混合させることで、均一で大口径の改良体を造成する。また同時に攪拌軸ロッドスクリュを正回転あるいは逆回転を組み合わせることで、固化材混入スラリー量に見合う土量を排出することによって、改良時の地盤変位を制御し抑制できる。



図—3 施工手順

3. SDM 工法の改良仕様

(1) 標準改良径と改良断面積

本工法の改良径は、超高压噴射攪拌を基本原理としているため、対象土の粘着力、N 値により設定径が異なる。改良径 ϕ 1.6 m ~ ϕ 2.3 m \times 2 軸，面積 $A = 4 \text{ m}^2 \sim 8 \text{ m}^2$ と，従来の二軸式機械攪拌工法の ϕ

1.0 m \times 2 軸，面積 $A = 1.5 \text{ m}^2$ に比べ， $A = 2.7 \sim 5.3$ 倍の改良体が得られる。また，攪拌軸間の長さを 1.4 m ~ 2.0 m に変更することで，現場条件によりさらに様々な改良形状に変えることが可能である。適用対象土の範囲は，標準的には粘性土では $S_u \leq 70 \text{ kN/m}^2$ ，砂では $N \leq 20$ としている。SDM 工法の標準改良径を表—2 に示す。本工法では，より大径化および高粘着力地盤への適用として，SDM-Dy 工法を選定するなど経済性が図れる。

表—2 改良対象土質と改良径の関係

対象土質		SDM 工法*1)		SDM-Dy 工法*2)	
		改良径 D (m)	断面積 A (m ²)	改良径 D (m)	断面積 A (m ²)
砂	$N \leq 10$	1.8 m \times 2 軸	5.05	2.1 m \times 2 軸	6.81
	$10 \leq N \leq 20$	1.6 m \times 2 軸	4.02	1.9 m \times 2 軸	5.56
粘土	$S_u \leq 30 \text{ kN/m}^2$	2.0 m \times 2 軸	6.07	2.3 m \times 2 軸	8.08
	$30 < S_u \leq 40 \text{ kN/m}^2$	1.8 m \times 2 軸	5.05	2.1 m \times 2 軸	6.81
	$40 < S_u \leq 50 \text{ kN/m}^2$	1.6 m \times 2 軸	4.02	1.9 m \times 2 軸	5.56
	$50 < S_u \leq 70 \text{ kN/m}^2$	—	—	1.6 m \times 2 軸	3.92
腐植土	$w \leq 500 \%$	2.0 m \times 2 軸	6.07	2.3 m \times 2 軸	8.08

*1) SDM 工法：軸間 1.7 m，*2) SDM-Dy 工法：軸間 1.9 m の場合

(2) 施工仕様

(a) 適用地盤

SDM 工法の適用地盤を表—3 に示す。標準径 ϕ 1.0 m の攪拌翼を有するため，表層部あるいは空打ち部のコンクリートがら，廃棄物，碎石，玉石等の障害物がある場合には，あらかじめ撤去が必要である。

表—3 適用地盤

土質	適用地盤
砂質土	$N \leq 20$
粘土	$S_u \leq 70 \text{ kN/m}^2$
腐植土	$w \leq 500 \%$

(b) 標準施工仕様

本工法の攪拌混合は超高压噴流体による対象地盤の切削破壊・混合攪拌が主体であるため，施工時の吐出圧力 p および吐出量 q ，改良時間 t および回転数 r 等の管理が重要で，その標準施工仕様を表—4 に示す。

表—4 標準施工仕様

固化材	セメント系固化材
水・固化材比	W/C = 1.0(1.5)
吐出圧力 p	$p = 40 \text{ MPa}$
吐出量 q	$q = 100 \sim 150 \text{ l/分}$
回転数 r	$20 \pm 2 \text{ rpm}$
改良時間 t	$\geq 4 \text{ 分/m}$

(3) 改良土の性状

本工法により改良された改良土の室内改良強さ (q_{ul}) と現場改良強さ (q_{uf}) の関係を図-4に示す。この関係によると q_{uf} と q_{ul} の比は、 $\bar{q}_{uf} \approx 1/2\bar{q}_{ul}$ 程度が得られている。また、超高压ジェット攪拌部と機械攪拌部との強度のばらつきは、ほぼ同等程度である。また、設計において、改良体の設計強度 (q_{ud}) と室内改良強さ (q_{ul}) の関係は一般的に式-1としている。

$$q_{ud} = \frac{1}{3} \times \bar{q}_{ul} \quad \text{式-1}$$

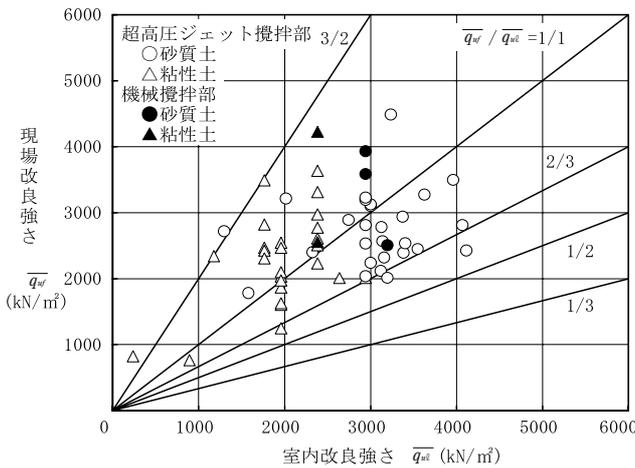


図-4 改良土の室内～現場強さの関係

4. 地盤の変位制御方法と変位予測

(1) 地盤変位の抑制制御と効果

本工法の地盤変位を抑制させる制御方法は、施工時に図-5に示すように攪拌軸に装着したオーガースクリュの回転を正回転と逆回転の比率を組み合わせることで行うことができる。図-6は攪拌軸の正回転と逆回転の比率と排出土量の関係の一例を示したもので、この関係をもとに精度の高い変位抑制管理が可能である。また、排出土率は、土質にもよるが標準排出土率は100%である。

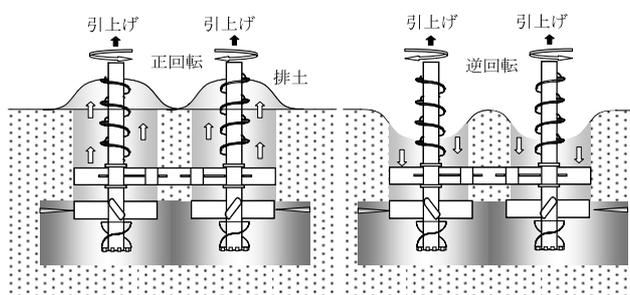


図-5 正回転と逆回転による排土制御模式図

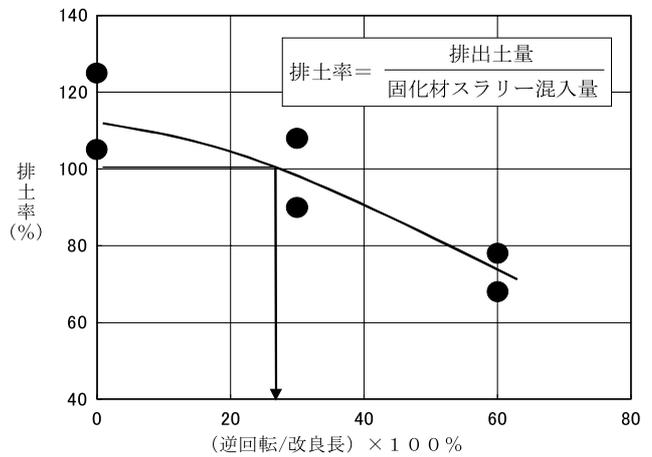


図-6 正・逆回転比率と排出土率の関係(一例)

(2) 水平変位量の測定例

施工時の地盤の水平変位の測定例として、従来方式(非排土方式, 排土率25%)と排土方式(排土率75%)の施工方法により、挿入式傾斜計を設置し比較したものである。改良仕様は表-5に示すように、貫入長 $L = 12\text{ m}$ 、改良長 $L_c = 10\text{ m}$ において、改良部(改良杭芯)と傾斜計の離隔距離を 2.0 m とし、その結果を図-7に示す。SDM施工による水平変位は、従来方式と比較すると、 $1/10 \sim 1/5$ に低減しており、排出土率を高め、確実に排出することが地盤の水平変位の低減に寄与する。また、水平変位は地盤内への固化材スラリー混入量と排出土率との関係には密接な関

表-5 試験施工における改良仕様

貫入長	$L = 12\text{ m}, \Sigma L = 72\text{ m}$	ピッチ	$1.5\text{ m} \times 3.0\text{ m}$, 千鳥配置
改良長	$L_c = 10\text{ m}, \Sigma L_c = 60\text{ m}$	面積比	$A_s = 96\%$
施工仕様	$p = 40\text{ MPa}$, $q = 100\text{ l/分} \times 2\text{ 軸}$	改良強度	$q_u = 600\text{ kN/m}^2$
混入量	$aw = 110\text{ kg/m}^3$	改良径	$D = 1.8\text{ m} \times 2\text{ 軸}$
改良時間	$t = 5\text{ 分/m}$	軸間長	$L = 1.5\text{ m}$
施工本数	SDM:3セット 従来式:3セット	改良面積	$A = 4.89\text{ m}^2$
水・固化材比	W/C = 1.5	固化材	ジオライト 10

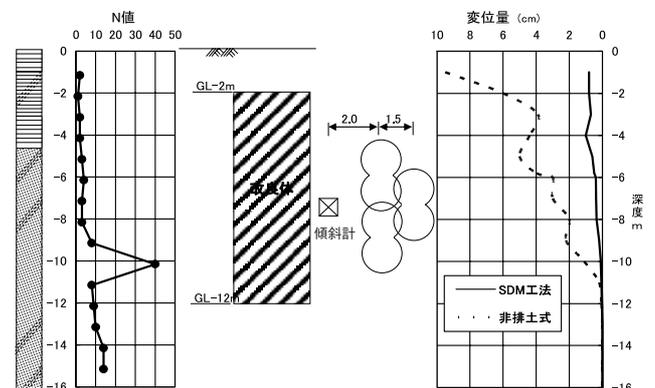


図-7 施工時における地盤変位計測例

係がある。

(3) 地盤水平変位量の推移

SDM 施工時における改良深度 L と改良体側面からの傾斜計位置 X の比 (X/L) と地盤水平変位量 δ の関係を図-8 に示す。SDM 施工を $L = 10$ m の深度まで行った場合、SDM 改良体に近接した $X = 1$ m ($X/L = 0.1$) における水平変位量は、 $\delta = 1$ cm 程度と極めて小さく、近接した施工による変位は少ない。また、 $X/L = 0.4$ 以上では、 δ はゼロに等しくほぼ水平変位は生じないことから、環境面に配慮した地盤改良工法である。

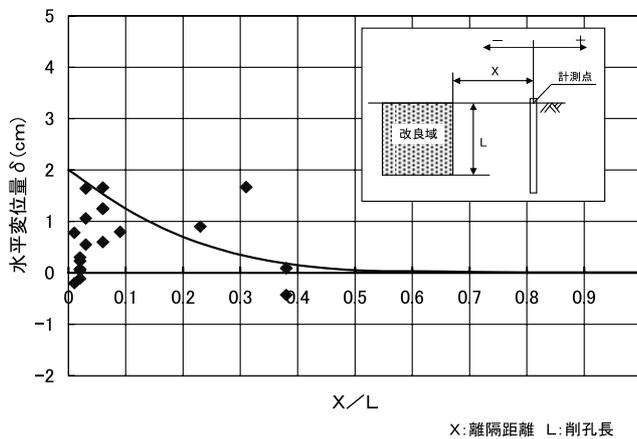


図-8 SDM 工法における地盤水平変位量推移

5. 施工事例

本工事は共同溝の築造工事において、掘削に伴う受働土圧の増加を目的とした底盤改良と周辺地盤と土留め矢板の変形防止および掘削時の止水防止を目的としたものである。工事仕様は改良深度 8.6 m、改良長 3.6 m、改良本数 120 セット、設計改良強度 $q_u = 1000$ kN/m² である。また、SDM 改良仕様は、改良径 $\phi 2.0$ m \times 2 軸、断面積 $A = 5.69$ m²、 $p = 30$ MPa、 $q = 130$ l/分、改良時間 $t = 5$ 分/m である。図-9 に SDM 改良体の配置図、図-10 に施工断面図を示

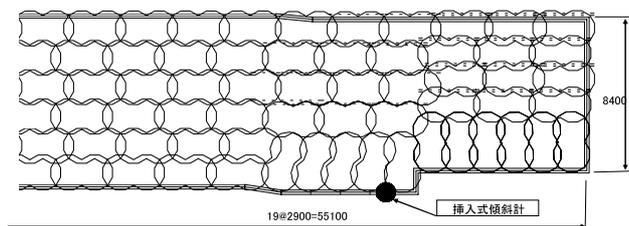


図-9 共同溝の SDM 改良杭配置平面図

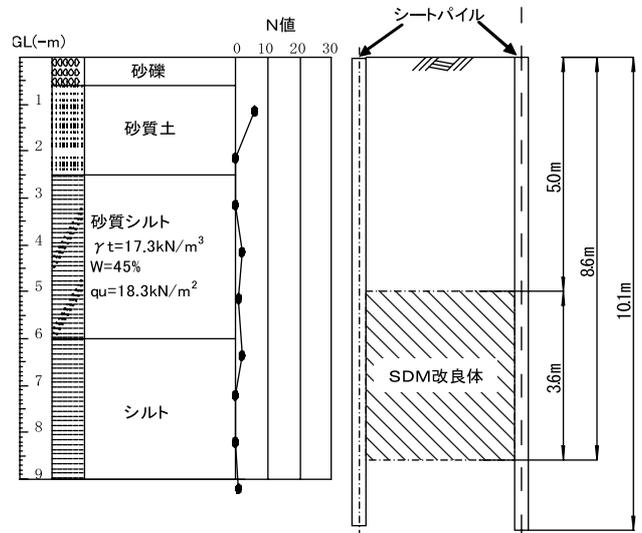


図-10 土質柱状図と施工断面図

す。変位抑制方法では、回転比率を 50% として行った。SDM 施工時の排出土は、混入固化材スラリー量のほぼ 100% の原土が排出され、原土には固化材の混入が見られなかった。また、図-9 に示した位置に挿入式傾斜計を設置し、地盤の水平変位を測定した結果を図-11 に示す。この結果、水平変位量は約 1 cm であり、周辺地盤への影響は認められなかった。

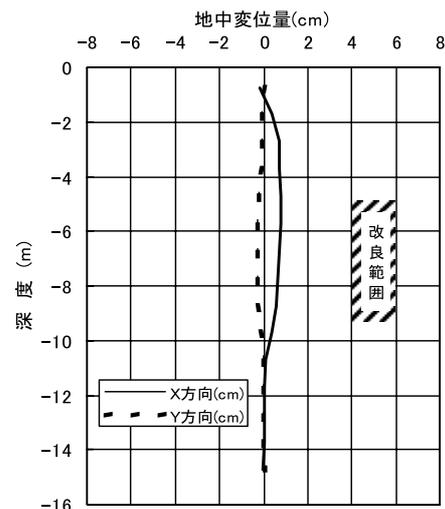


図-11 土留め矢板部の水平変位量測定結果

6. あとがき

SDM 工法は、機械攪拌方式と高圧噴射攪拌方式を組み合わせた複合技術で、大口径な改良体を造成しつつ、既設物との密着施工等が図れ、経済性の高い地盤改良工法といえる。また最近の都市土木で求められる低変位な施工として、改良時の地盤変位の制御により

抑制が図れる。また、排出土が他の高圧噴射攪拌工法と異なり、固化材を含まない原土であることから、水中施工も可能なことなど環境面に配慮した環境にやさしい工法で、今後、様々な施工環境に応じて用いられることが考えられる。

なお、本工法は、国土交通省の公共工事等における新技術活用システム（NETIS）に登録（KT-980134-V）されており、活用効果評価において技術の優位性が高く安定性が確認されたことから、有用な新技術の活用促進として設計比較対象技術に指定されている。

JCMA

《参考文献》

- 1) 鈴木孝一・西尾経：機械排土式低変位高圧噴射攪拌工法—SDM工法とLDis工法の設計・施工—、軟弱地盤の改良⑩、総合土木研究所、p.89（1999.11）



【筆者紹介】

鈴木 孝一（すずき こういち）
小野田ケミコ㈱
取締役常務執行役員
営業本部長



西尾 経（にしお わたる）
小野田ケミコ㈱
技術・工事本部
技術・開発部
部長



松岡 大介（まつおか だいすけ）
小野田ケミコ㈱
営業本部
技術設計部
課長代理

建設の施工企画 2005年バックナンバー

平成17年1月号（第659号）～平成17年12月号（第670号）

1月号（第659号）
建設未来特集

6月号（第664号）
建設施工の環境対策特集

10月号（第668号）
海外の建設施工特集

2月号（第660号）
建設ロボットとIT技術特集

7月号（第665号）
建設施工の環境対策—大気環境特集

11月号（第669号）
トンネル・シールド特集

3月号（第661号）
建設機械施工の安全対策特集

8月号（第666号）
解体・再生工法特集

12月号（第670号）
特殊条件下での建設施工機械特集

4月号（第662号）
建設機械施工の安全対策特集

9月号（第667号）
専門工事業・リースレンタル特集

■体裁 A4判
■定価 各1部840円
(本体800円)

5月号（第663号）
災害復旧・防災対策特集

■送料 100円

社団法人 日本建設機械化協会

〒105-0011 東京都港区芝公園3-5-8（機械振興会館）

Tel. 03 (3433) 1501 Fax. 03 (3432) 0289 <http://www.jcmanet.or.jp>