

9. 高粘着力地盤へのハイブリッド攪拌工法の適用と改良品質

小野田ケミコ株式会社

鈴木 孝一

西尾 経

○近藤 省一

中央大学理工学部

齋藤 邦夫

1. はじめに

地盤改良は、都市近郊の再開発事業をはじめ既設構造物に近接した開削工事や既設構造物の耐震対策工事等に幅広く適用されている。しかしながら、上述した工事では、改良体相互あるいは構造物と改良体を確実に密着、一体化させることならびに地盤変位を抑制することが、最も重要な施工要件となる。

このような施工要件を満たす工法の一つとして、機械攪拌と超高圧噴射攪拌を併用したハイブリッド攪拌混合処理工法（以下、SDM-Dy 工法と略記する）が開発し、現場で多数の実績を有している。

本稿では、SDM-Dy 工法の適用拡大の要請から、深層部の高粘着性の粘性土層におけるその出来形および改良品質についての調査結果を報告する。

2. 工法のメカニズム

2.1 工法概要

SDM-Dy 工法 (Dynamic Super Deep Mixing Method) は固化材を超高圧で噴射させて地盤を切削、攪拌、混合して所要の改良体を地盤内に造成する。そのときの超高圧噴射による地盤の破壊力は、次式に示す通りである¹⁾。

$$F \doteq \rho \cdot q \cdot v \\ = \rho \cdot (A \cdot v) \cdot v = \rho \cdot A \cdot v^2 \quad \text{式(1)}$$

ここに、F：高圧噴流の破壊力 (N)

ρ ：密度($\rho=\gamma/g$) ($N \cdot s^2/m^4$)

q：ポンプ吐出流量 (m^3/s) $q=A \cdot v$

v：流速 (m/s)

A：ノズル断面積 (m^2)

また、流速(v)は $\sqrt{p}$ に比例することから破壊力Fは

$$F \doteq K \cdot A \cdot p \doteq K' \cdot q \cdot p \quad \text{式(2)}$$

ここに、p：噴射圧力 (Pa)

K, K'：係数

式(2)より超高圧ジェット破壊力は、噴射圧力pとポンプ吐出流量qに比例する。

本工法は、式(2)に基づき、噴射圧力を従来工法の1.5～2倍の $p=30 \sim 40MPa$ 、同じく吐出量を1.5～3倍の吐出量 $q=150 \sim 300l/\text{分}$ とし、超高圧大容量化を図って、高粘着力粘性土地盤への適用と、より大口径の改良体造成を狙って開発した。写真-1に三点支持式杭打機をベースマシンとしたSDM-Dyの二軸施工機を示す。本工法は、機械攪拌翼（標準翼径 $\phi 1.0m$ ）の先端部から固化材スラリーを超高圧で噴射し、改良体外周部を超高圧ジェットにより攪拌混合造成する。これにより、基礎杭、山留め壁等との密着施工が可能であり、改良体相互のラップ施工による一体化が図れる等、従来工法にはない優れた特長を備えている²⁾。

また、従来の機械攪拌工法に比べて、超高圧噴射攪拌により、改良径 $D=\phi 2.8m$ までの大口径改良体が造成できる。そのため、日当たり施工量は機械攪拌工法の概ね2～3倍となっており、大幅な工期短縮が図れる。また、改良体造成径に対し、機械攪拌翼径が小さいため、攪拌翼貫入による原地盤を乱す割合が概ね15%程度と少なく、通過域の強度低下は他工法に比べ著しく小さい。さらに、攪拌軸に装着したオーガースクリュー機構により、固化材スラリー量に見合う量の排土を制御し、低変位施工をも同時に可能とした³⁾。



写真-1 SDM-Dy 二軸式施工機の噴射状況

2.2 改良メカニズム

図－１はSDM-Dy工法の改良メカニズムの模式図である。機械攪拌翼先端部の噴射攪拌装置から地盤中に固化材スラリーを超高圧にして水平方向に噴射させ、回転しつつ引き上げる。これにより地盤は切削破壊すると同時に固化材スラリーと攪拌混合される。すなわち、切削混合攪拌された混合土は、噴射攪拌装置の背面に瞬時に移動すると共に、機械攪拌翼による攪拌が付加され、均質性の高い大口径改良体が造成される^{2),4)}。

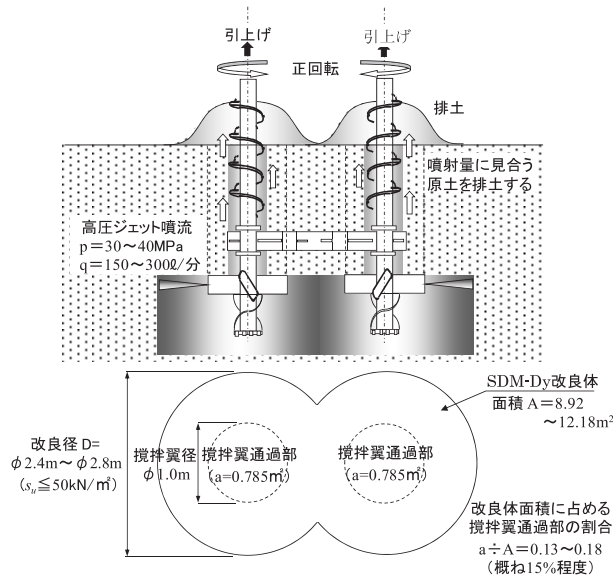


図-1 SDM-Dy工法の改良メカニズム

2.3 機械構成

本工法に用いる施工機械構成と仕様を表－１に示す。SDM-Dy 処理機では三点支持式杭打機を用い、駆動装置は二軸式アースオーガで超高圧耐圧化が施されている。また、超高圧ポンプは、固化材スラリーを $q=150\sim300$ ℓ/分もの大流量で安定して吐出させることが可能である。

施工管理装置は、噴射圧力、噴射流量、貫入・改良速度等の管理データをプラントとSDM処理機双方の各検出器でリアルタイムに監視し、総合管理装置に表示されると共に自動記録される。

表-1 施工機械構成

機 械 名	仕 様
SDM-Dy 処理機	SDM駆動装置、耐圧40MPa 施工管理装置
SDM-Dyオーガスクリュ	特殊オーガスクリュ×2軸 SDMオーガヘッド標準φ1.0m×2軸 軸間長1.4m~2.0m
超高圧大容量ポンプ	吐出圧力 $p=40$ MPa 吐出量 $q=150\sim300$ ℓ/分
スラリープラント	処理能力 $20\sim40$ m³/h セメントサイロ30t
発動発電機	プラント用、超高圧ポンプ用、SDM処理機用
バックホウ	0.8m³、排出ガス対策型

3. 高粘着力地盤における出来形と改良品質

一般に地盤改良工法は、 $N\leq 4$ 、 $q_u\leq 100$ kN/m²の軟弱地盤⁵⁾で用いられることが多く、従来の高圧噴射攪拌工法の適用地盤は、概ね $s_u\leq qu/2=50$ kN/m²以下であった。近年、都市部では地盤内空間の高度利用化から施工深度がより深くなり、従来の適用地盤を超えた高粘着力を有する地盤に対応することが求められている。

以下に述べる２つの事例は、高粘着力を有する沖積粘性土地盤を対象に、本工法を適用して造成した改良体の出来形および改良品質について精査した結果である。

3.1 施工例１（地盤強度 $s_u=120\sim140$ kN/m²）

(1) 土質性状

施工位置の土質性状及び改良位置を図－２に示す。対象地盤中、GL-2.0m~2.7mの位置にAc1層($s_u=35$ kN/m²)とGL-6.5m~10.0mにAc2層($s_u=40$ kN/m²)およびGL-16.6m~19.6mにはAc3層($s_u=120\sim140$ kN/m²)がそれぞれ堆積している。地盤性状は、湿潤密度 $\rho_t=1.58\sim1.69$ g/cm³、自然含水比 $w_n=53\sim69\%$ である。

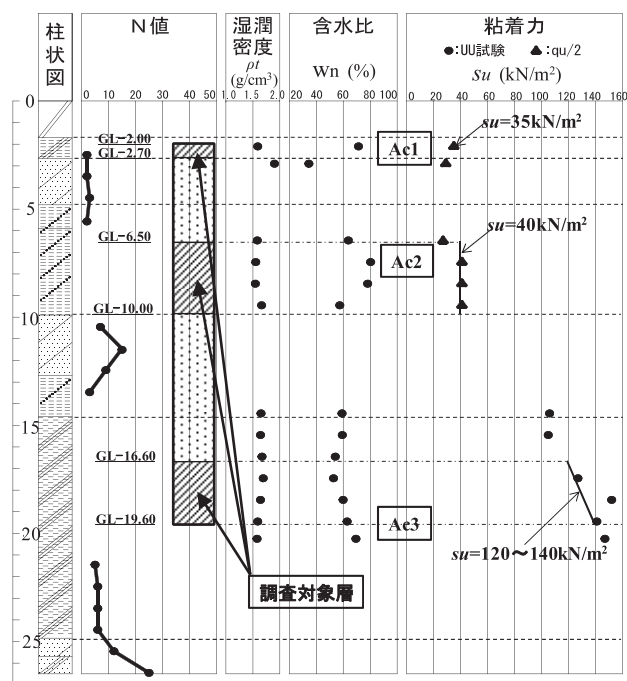


図-2 土質性状と調査対象層

(2) 改良仕様

深度GL-2.0m~19.6mの土層に最大改良径 $D=\phi 2.60$ mの改良体を造成する。施工仕様は圧力 $p=40$ MPa、吐出量 $q=300$ ℓ/分、改良時間 $t=4$ 分/mである。

(3) 出来形確認

① Ac1層($s_u=35$ kN/m²)

GL-2.0mまで改良体を造成し、試掘により改良体頭部を露出させて出来形を確認した。試掘状況写真を写真－２に示す。

改良体頭部の改良径を測定した結果、改良径 $D \approx \phi 2.60\text{m}$ が確認できた。同時に、二軸大口径改良としても均質性の高い断面性状を確認することができた。

② A_{c2} 層 ($s_u=40\text{kN/m}^2$)

GL-6.5m～10.0m の A_{c2} 層に対し、改良体中心から放射状に 5cm 間隔で、二重管サンプラー($\phi 86\text{mm}$)を用いて計 5 本の試料土採取を実施した。その内、3 本からコア全長に渡り固結していることが確認された。なお、各サンプリング位置は挿入式傾斜計により補正し、改良径 $D=\phi 2.54\text{m}$ を特定した。

③ A_{c3} 層 ($s_u=120\sim 140\text{kN/m}^2$)

GL-16.6m～19.6m の A_{c3} 層においては、 A_{c2} 層と同様にコア採取を行い、その固結状況から、改良体径を特定し、改良径 $D=\phi 1.50\text{m}$ が確認された。

①～③によって確認された改良径の検測結果と原地盤の粘着力の関係から、図-3 が得られた。確認された改良径により導かれた近似線は、設計改良径と同等の結果が得られることがわかった。

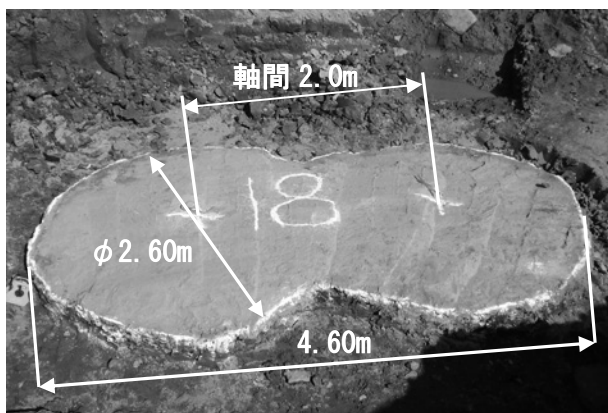


写真-2 改良天端試掘状況 (A_{c1} 層 $s_u=35\text{kN/m}^2$)

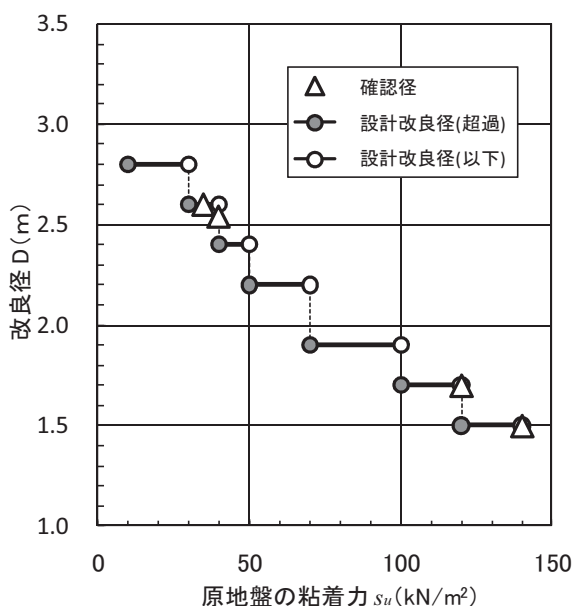


図-3 A_c 層の出来形検測結果

(4) 品質確認

調査対象層毎の改良土の一軸圧縮強さを表-2 に示す。 $s_u=35\text{kN/m}^2$ の A_{c1} 層では $\overline{q_{uf}}=1,835\text{kN/m}^2$ が確認できた。また、 $s_u=40\text{kN/m}^2$ の A_{c2} 層では、 $\overline{q_{uf}}=3,045\text{kN/m}^2$ で $V=6.0\%$ であった。 $s_u=120\sim 140\text{kN/m}^2$ の A_{c3} 層では $\overline{q_{uf}}=5,483\text{kN/m}^2$ で $V=8.4\%$ であった。いずれの土層も均質性の高い状況が確認できた。

表-2 一軸圧縮試験結果

調査位置	一軸圧縮強さ q_{uf} (kN/m^2)	平均値 $\overline{q_{uf}}$ (kN/m^2)	標準偏差 σ_{n-1} (kN/m^2)	変動係数 V (%)
A_{c1}	1,560	1,835	-----	-----
	2,110			
A_{c2}	3,070	3,045	184	6.0
	3,180			
	2,710			
	3,040			
	3,240			
	3,030			
A_{c3}	5,030	5,483	461	8.4
	5,280			
	5,880			
	6,190			
	5,430			
	5,090			

3.2 施工例 2 (地盤強度 $s_u=80\sim 120\text{kN/m}^2$)

(1) 土質性状

図-4 は、別途 SDM-Dy 工法を適用した原地盤の土質柱状図および土質性状である。主な改良対象土層であるシルト層は、湿潤密度 $\rho_t=1.57\sim 1.76\text{g/cm}^3$ 、含水比 $w_n=52.0\sim 69.5\%$ 、粘着力は GL-15m まで $s_u\leq 50\text{kN/m}^2$ である。それ以深は、深度方向に大きな強度増加が見られ、 $s_u=80\sim 120\text{kN/m}^2$ の高粘着力粘性土地盤である。

(2) 改良仕様

改良体の造成は、図-4 に示す深度 GL-4.5m～-22.5m 中の 3 箇所の沖積粘性土層で実施した。すなわち、中間地中梁改良部 2 箇所と底盤改良部 1 箇所の計 3 箇所を選定した。なお施工仕様は、前述した施工例 1 と同様である。

(3) 出来形確認

設計径 $D=\phi 1.7\text{m}$ に対し、改良体の外周位置でオールコア採取を実施した。その結果、コア全長で固結体が確認され、 $s_u=120\text{kN/m}^2$ の高粘着力地盤において、 $D=\phi 1.7\text{m}$ 以上の改良径が確認できた。

また、GL-17.5m の $s_u=80\text{kN/m}^2$ 位置において、掘削時の改良径を調べた結果、 $D=\phi 1.90\text{m}\sim 1.95\text{m}$ が確認でき、平均改良径 $\overline{D}=\phi 1.93\text{m}$ であった。

(4) 品質確認

図-5は、改良径に対してオールコア採取を実施した位置を示す。採取位置は、改良体中心位置から改良径DのD/4の位置2箇所（No.1・No.2）とラップ部1箇所（No.3）の計3箇所であり、サンプリング試料について一軸圧縮試験を実施した。表-3が各試料の一軸圧縮試験結果である。

中間地中梁改良部の上層位置（ $s_u=35\text{kN/m}^2$ ）では、 $q_{uf}=2,921\text{kN/m}^2$ 、 $V=22.3\%$ であった。中層位置（ $s_u=45\text{kN/m}^2$ ）では、 $q_{uf}=4,437\text{kN/m}^2$ 、 $V=21.6\%$ となった。また、底盤改良部の下層位置（ $s_u=80\sim 120\text{kN/m}^2$ ）では、 $q_{uf}=4,823\text{kN/m}^2$ の $V=19.7\%$ であった。深度と共に変動係数は増大するが、 $V=19.7\%\sim 22.3\%$ が確認され、機械攪拌工法の $V=20\%\sim 40\%^6$ と比較しても良好な結果が得られた。また、コアの連続性についてもRQD値90%以上となり、固結部の連続性が高いことが認められた。

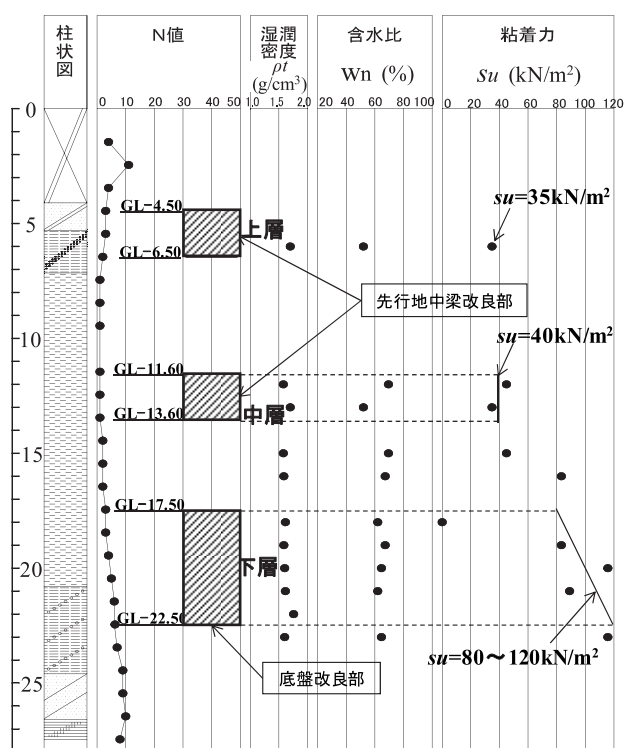
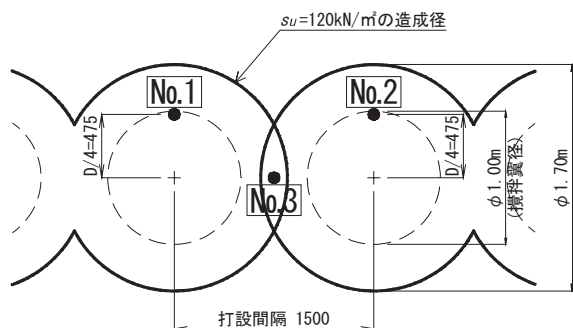


図-4 土質性状と調査対象層



● オールコア採取位置
(スリーブ内蔵二重管サンブラーφ86mm)

図-5 コア採取位置

表-3 一軸圧縮試験結果

採取位置	一軸圧縮強度 q_{uf} (kN/㎡)			平均値 $\overline{q}_{uf}$ (kN/㎡)	標準偏差 σ_{n-1} (kN/㎡)	変動係数 V (%)
	D/4地点		ラップ部			
	No. 1	No. 2				
上層	2,571	2,397	4,323	2,921	650	22.3
	3,090	3,181	2,566			
	2,779	2,112	3,273			
平均	2,688		3,387			
中層	5,204	4,182	5,384	4,347	938	21.6
	4,634	3,402	3,917			
	2,832	3,959	5,611			
平均	4,036		4,971			
下層	6,058	4,578	3,307	4,823	952	19.7
	5,524	3,984	6,213			
	4,576	4,753	4,411			
平均	4,912		4,644			

4. まとめ

機械攪拌に高圧噴射攪拌方式を組み合わせたハイブリッド攪拌混合処理工法であるSDM-Dy工法を、 $s_u>100\text{kN/m}^2$ の高粘着力粘性土地盤を対象に適用した結果、以下のことが検証できた。

- ①噴射圧力 $p=40\text{MPa}$ 、吐出量 $q=300\text{ l/分}$ の改良仕様において、造成される改良径は、 $s_u=120\sim 140\text{kN/m}^2$ の地盤では $\phi 1.5\text{m}$ 、 $s_u=80\sim 120\text{kN/m}^2$ の地盤では $\phi 1.7\text{m}$ 以上が確認できた。
- ②改良品質では、高粘着力地盤においても改良強度の変動係数は $V=6\%\sim 22\%$ が確認され、一般的な機械攪拌工法の $V=20\%\sim 40\%$ と比較しても良好な結果が得られた。

以上の結果より、吐出圧力・吐出流量を従来の2～3倍に増加させることにより、高粘着力地盤に対しても安定した大口径改良体が造成可能である。また、施工方法では、既設構造物との密着性、改良体相互のラップ施工や低変位施工等の特長を併せ持つことから経済性も高いと判断される。

参考文献

- 1) 小野田ケミコ(株)：ミニマックス工法技術・積算資料第15版，2009.12
- 2) 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，総合土木研究所，pp.89～96，1999.11
- 3) 鈴木孝一・西尾経・田中信哉・松岡大介・齋藤邦夫：SDM工法（高速低変位深層混合処理工法）－機械攪拌併用高圧噴射攪拌による地盤変位の抑制制御型工法の概要と施工事例－，基礎工，Vol.37，NO.5，pp.88～90，2009.5
- 4) 鈴木孝一・西尾経・松岡大介：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)，建設の施工企画，No.698，pp.29～34，2008.4
- 5) 日本道路公団：道路土工指針，p.29，1986
- 6) 地盤工学会地盤改良効果の予測と実際編集委員会編：地盤改良効果の予測と実際，pp.215～216，2000.2