

噴射攪拌工法の高速施工技術

—低排泥低変位噴射攪拌工法「OPTジェット」の開発と適用

川崎 廣貴・飯泉 勝・藤井 誠司・藤澤 伸行

〈基礎工〉2009年5月号（Vol. 37, No. 5）から抜刷

発行 総合土木研究所

報文 噴射攪拌工法の高速度施工技術

—低排泥低変位噴射攪拌工法「OPTジェット」の開発と適用

川崎 廣貴*／飯泉 勝**／藤井 誠司***／藤澤 伸行****

1. はじめに

近年、社会インフラとしてわが国の高度成長期に整備された土木構造物は、老朽化や耐震性向上の必要性から強化更新時期を迎えている。この強化更新の対策工事では、施設が稼動中で、土木構造物は供用中となっていることがほとんどであり、設計・施工計画に当っては既設構造物への安全性、および対策工法の高速度施工と効率性が要求されている。こうした社会ニーズに適応するためには、既存技術をブレイクスルーした新技術の開発が必要であり、土木構造物の強化更新をより促進できる技術が求められている。

一方、地盤改良対策の技術には、圧密脱水・締固め・固化という地盤改良3原理に基づいた各種のものがあるが、既存施設に施工変位などの悪影響がないものとしては、図-1に示すような固化原理を利用した固化改良工法、すなわち薬液注入工法と攪拌混合工法に限られる。攪拌混合工法は、セメントやセメント系固化材の硬化材スラリーなどを原位置の軟弱地盤に吐出または噴射し、それを強制的に攪拌混合して地盤中に強固な固化改良体を造成するものであり、機械攪拌工法、噴射攪拌工法、機械と噴射を併用した複合攪拌工法の3種類に分類できる。

固化改良工法における各工法コストは、改良体積当りのコストで安価な順にこれらを並べると、現状では機械攪拌工法<複合攪拌工法<薬液注入工法<噴射攪拌工法の順になる。しかし、稼働中の既存施設での地盤改良工法を考えた場合に、施工機械が大口徑ボーリング機械程度に小さい噴射攪拌工法や薬液注入工法は施工上の融通

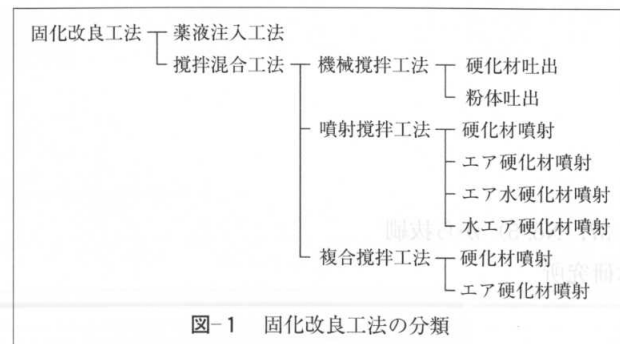


図-1 固化改良工法の分類

* KWSAKI Hirota	清水建設㈱ 土木技術本部	東京都港区芝浦 1-2-3
** IIZUMI Masaru	同 上 土木横浜支店 土木部	横浜市中区吉田町65-7
*** FUJII Seiji	同 上 土木技術本部	東京都港区芝浦 1-2-3
**** FUJISAWA Nobuyuki	ライト工業㈱ 生産事業本部	東京都千代田区九段北 4-2-35

性があるため、設計における工法選定上から優位となるものである。

特に噴射攪拌工法は、薬液注入工法が適用できない軟弱粘性土地盤やシルト地盤をも強固に固化できるため、既設構造物の老朽化対策や耐震性向上を目的とした構造物の強化・補強対策としては、経済性を除けばもっとも好適なものである。噴射攪拌工法をコスト面で、複合攪拌工法≒噴射攪拌工法<薬液注入工法とできれば、わが国の維持更新時代を迎えた社会ニーズにもっとも適合できるものと考えられる。

こうした観点から、筆者らは新たに低排泥低変位噴射攪拌工法「OPTジェット工法 (OPTimize Jet Method)」を開発して、これを建設工事に適用している。本工法は、従来工法を先駆的に進化させたものであり、新開発の噴射ヘッドと独自の噴射攪拌理論を用いて、高速施工により低排泥と低変位を実現しつつ、かつ幅広い改良体径(φ1.3~φ3.5m)を効率的に造成できるようにして、従来工法より経済性に優れた工法としたものである。

ここでは、OPTジェットの開発と適用と題して、最初にOPTジェットの概要と特徴を述べ、次に施工方法について説明する。最後に、適用事例として臨海部の砂質土主体の粘性土狭在地盤で実施した工事内容について報告する。

2. OPTジェットの概要

2.1 工法概念

噴射攪拌工法は、小口径のボーリングロッドを用いて大きな地盤改良体が造成可能であるため、従来から一般に狭隘な場所や既設構造物の地盤強化手段として用いられている。この施工方法は、ボーリングロッド先端から水平方向に圧縮空気と同時に水や硬化材スラリーを超高圧で噴射して、その音速に近い超高圧ジェット流の運動エネルギーを用いて改良対象地盤を切削破壊し、切削土粒子をエアリフトで地上に排出するとともに、切削部では残留土粒子と硬化材を攪拌混合して均質な固化改良体を造成するものである。

しかし、従来工法は、改良体積当りに占める硬化材噴射量が50%以上と多量で、施工時間もかかっていたため、

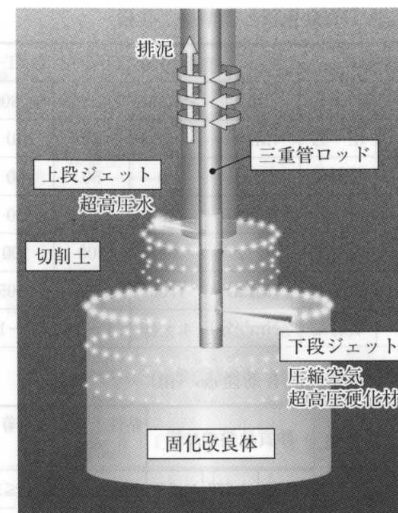


図-2 OPTジェットの工法概念

排泥量も多いという課題があった。このため、従来の噴射攪拌工法は地盤改良工法の中でもっともコストが高価で、その適用方法や施工箇所が限られるものであった。

OPTジェットは、三重管構造のロッドを使用して超高圧水・圧縮空気・超高圧硬化材の流体を独立して噴射する点は従来工法と同様であるが、摩擦抵抗が極小の噴射ヘッドの採用でジェットロスが小さくなったため、地盤の切削力が10%程度向上した。さらに、独自の噴射攪拌理論および上段と下段に噴射部を設ける工夫によって、施工合理化の向上がより図られたため、大口徑改良の従来工法に比べてトータルで30%程度の効率アップが図られている。図-2の工法概念に示すように、上段では超高圧水噴射のガイド切削で一定の空間形成を行ない、改良体造成時に発生する排泥がスムーズに排出できるように内圧解放効果を持たせた。これにより、下段の超高圧硬化材噴射と空気噴流流体のエネルギーによる地盤切削力が低下せず、改良対象地盤を効率よく破壊切削できる。これらの技術により、従来工法に比べてより高速施工を図ることが可能になり、経済的で高品質な改良体が造成できるようにしている。

2.2 特徴

本工法の特徴としては、下記のような項目があげられる。

2.2.1 コスト・工期の縮減

極小摩擦抵抗の噴射ヘッド、独自の噴射攪拌理論、上段と下段の噴射部設置という3つの新技術により、噴射攪拌効率が向上して高速施工ができる。このため、従来のエア水硬化材噴射工法 (CJG工法) に比べて、最大でコスト40%、工期60%の縮減が可能である。

2.2.2 低排泥・低変位の実現

噴射攪拌効率の向上による高速施工採用で、改良体積に対する水と硬化材スラリーの総噴射量が20~50%程度と少量になったことで、低排泥化に成功した。これにより、従来の噴射攪拌工法は水とスラリーの総噴射量が必ず50%以上で多いという課題を解決した。さらに、低噴射量の効果により周辺地盤への変位影響が小さくなった。この

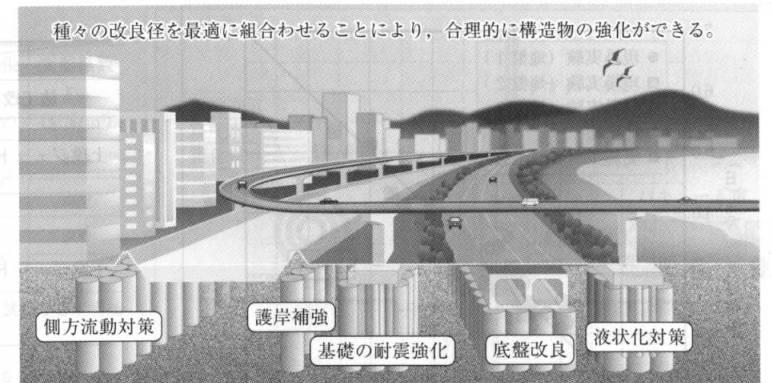


図-3 OPTジェットの適用概念

低排泥・低変位という点で、より環境に優しい工法を実現している。

2.2.3 幅広い改良径選択による合理化

従来の噴射攪拌工法は、改良出来形に対する施工仕様のパラメータ寄与度の解明が不正確であったため、施工仕様が1パターンで簡略化して設定されていた。本工法では、改良対象の地盤条件に対して7パターンの施工仕様を設けており、例えばN値がN≤30の砂地盤では改良径がφ1.3~3.5mで造成できるため、対象改良範囲に対して合理的な改良体配置の組み合わせが可能となり、設計をより経済性が高いものにできる。また、単一の大口径の施工仕様のみでは、既施工改良体の中に改良体を造成してしまうコラムインコラムという問題が生じやすいが、本工法の幅広い改良径選択によりこれを回避できるため、排泥量が少なくなって良好な改良体品質を確保することが可能である。

2.2.4 設計・施工条件を考慮した最適施工法の提供

独自の噴射攪拌理論を用いて改良径を設定できるため、複雑で特殊な地盤などの標準施工パターン以外の設計・施工条件においても、合理的な噴射攪拌仕様の施工法を提供することができる。

2.3 工法の適用

図-3にはOPTジェットの適用概念を示す。このように、あらゆる構造物の地盤強化分野における種々の用途に適用可能であり、新設構造物や既設構造物の合理的で最適な構造物強化を実施することができる。また、従来工法と同様な用途である土留め壁欠損部補強、土留め工底盤改良やシールド発進防護工などの限定的な領域の地盤強化としての仮設用途にも、経済性優位で用いることができる。

3. 工法理論と改良仕様

3.1 工法理論

OPTジェットの設計改良径は、本工法が硬化材スラリーのジェット噴射を主体として地盤を切削破壊し、固化改良体を造成するものであるため、改良径パラメータの第一因子となる施工対象地盤の地盤条件、すなわち改良対象土質の強度や物理特性などを正確に調査・把握して、これを適切に設定することが重要である。調査すべき地盤条件としては、砂地盤では、N値・礫分含有率・細粒

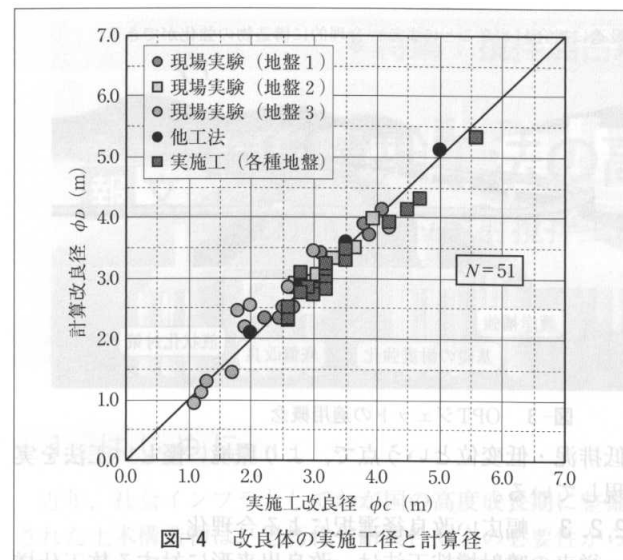


図-4 改良体の実施工径と計算径

分含有率であり、粘性土地盤では、粘着力・粗粒分含有率・塑性指数・液性指数を主なものとしてあげることができる。一方、改良体造成の出来形に重要な役割を持つ地盤切削目的のジェット噴射力は、噴射硬化材の質量・圧力・噴射量・造成時間（引上げ時間）・回転速度・噴射孔数・噴射圧縮空気量などがパラメータとなっており、これらは複雑な関数形となっている。

OPTジェットでは、下段ジェットの硬化材スラリの噴射エネルギーを主体として、改良体を造成するものであり、この設計改良径 ϕ_d は独自に開発した経験的な式(1)を用いて算定される。

$$\phi_d = D_L (D_u, S, \rho, P, Q, t, R, N, Q_a) \dots (1)$$

ここに、 D_L ：下段ジェットによる改良径切削関数

D_u ：上段ジェットによる増加係数

S ：地盤強度と物理特性（ N 値、粘着力など）

ρ ：噴射硬化材質量（ g/cm^3 ）

P ：硬化材噴射圧力（ MPa ）

Q ：硬化材噴射量（ $\text{l}/\text{分}$ ）

t ：造成時間（引上げ時間）（ $\text{分}/\text{m}$ ）

R ：回転速度（ rpm ）

N ：硬化材噴射孔数（個）

Q_a ：噴射圧縮空気量（ $\text{Nm}^3/\text{分}$ ）

同式による改良体の計算径 ϕ_d と現場施工による実施工径 ϕ_c の関係を図-4に示すが、同図に見られるように相関性がきわめて高いことが明らかである。同式により、種々の地盤条件を考慮してさまざまな地盤改良径が設定可能であることがわかる。

3.2 改良仕様

3.2.1 標準施工仕様

OPTジェットは、施工する改良体積で合理的なものになるように、OPT-1～OPT-3の3種類の施工タイプを設けている。表-1には、OPTジェット工法におけるタイプ別の施工改良体積の目安と標準施工仕様を示す。なお、狭小エリアで施工する場合などでは、施工数量に関わらずOPT-3を適用せざるを得ないことがあるので、施工条件を十分把握して施工仕様を設定する必要がある。

表-1 施工改良体積と標準施工仕様

			OPT-1	OPT-2	OPT-3
施工改良体積 V の目安 (m^3)			$\geq 1,000$	$< 1,000$	< 300
上段ジェット	切削水	圧力 (MPa)	40	40	40
		噴射量 ($\text{l}/\text{分}$)	50	50	50
下段ジェット	硬化材	圧力 (MPa)	40	40	30
		噴射量 ($\text{l}/\text{分}$)	300	200	100
	圧縮空気	圧力 (MPa)	1.05	1.05	1.05
		噴射量 ($\text{Nm}^3/\text{分}$)	4～16	4～16	4～16

表-2 標準設計有効径 ϕ_d (m)

タイプ	施工改良体積 V (m^3)	造成時間 t ($\text{分}/\text{m}$)	砂質地盤の N 値			粘性土地盤の粘着力 c (kN/m^2)		
			$N \leq 30$	$N \leq 50$	$N \leq 70$	$c \leq 25$	$c \leq 35$	$c \leq 50$
OPT-1	$\geq 1,000$	4	2.5	2.3	2.1	2.5	2.2	1.9
		7	3.0	2.8	2.6	3.0	2.6	2.2
		9	3.5	3.2	2.9	3.5	3.0	2.5
OPT-2	$< 1,000$	5	2.0	1.8	1.6	2.3	1.9	1.6
		8	2.4	2.2	2.0	2.6	2.2	1.8
		10	2.7	2.4	2.2	2.9	2.5	2.1
OPT-3	< 300	10	1.3	—	—	1.6	—	—

注) 1. 設計有効径は、深度方向の施工精度を考慮して20m以深に対して10mを超える毎に10cmずつ低減して配置計画を行なう必要がある。
2. 改良対象の地盤条件が次の条件を満たす場合は、試験施工を実施して造成仕様を設定する。①粘性土の粘着力 $c > 50 \text{ kN}/\text{m}^2$ 、②土層の粘土分が35%以上、③礫質土の礫分が30%以上、④有機質土

3.2.2 設計有効径 ϕ_d

設計有効径 ϕ_d は、改良対象となる地盤条件と表-1に示した施工仕様によって設定する。OPTジェットにおける標準的な設計有効径 ϕ_d を表-2に示す。同表の適用においては、改良対象地盤において砂質土で最大 N 値を、粘性土で最大粘着力を使用して設計有効径を定める。なお、このほかに砂地盤の N 値が $N \leq 20$ の液状化対策用の施工仕様もあるが、ここでは割愛する。

改良体の配置計画においては、限定された対象改良範囲で合理的なものとなるように、改良径を組合わせながら適切に配置を行ない、設計をより経済的なものとする必要がある。設計配置は、先行改良体内での後行改良体施工（コラムインコラムと称する）や先行改良体の噴射流遮断による未改良域形成などが生じないように、留意して計画を行なう必要がある。

なお同表は、あくまでも改良体の設計有効径の目安を示したものである。実際には種々の地盤条件・施工条件に応じて、改良体の噴射条件と施工仕様を任意に設定することも可能である。

3.2.3 設計強度

OPTジェット改良体の設計強度および力学特性は、基本設計においては表-3に示すものを目安として設定する。詳細設計または施工前においては、室内配合試験を行なって一軸圧縮試験により所要強度となることを確認する。ここでは、改良体強度が改良対象地盤の地域性による地質年代や堆積条件などの土質特性の影響を受け

表-3 改良体強度の目安

硬化材の種類	土質	設計強度 q_u (MN/m^2)	粘着力 c (MN/m^2)	付着力 f (MN/m^2)	曲げ引張り強さ σ_t (MN/m^2)	変形係数 E_{50} (MN/m^2)
OP1号	砂質土	2.0	1.0	$1/5 \times c$	$1/2 \times c$	400
	粘性土	1.0	0.5			200
OP2号	砂質土	1.0	0.5	$1/5 \times c$	$1/2 \times c$	200
	粘性土	0.5	0.25			100

注) 1. 設計強度は、詳細設計または施工前において室内配合試験を必ず実施して、所要値となることを確認する。
2. 硬化材は、OP1号を適用することを標準とする。
3. OP2号は、液状化防止用、または強度抑制用に使用する。
4. 有機質土の改良体の設計強度は室内配合試験により設定する。

表-4 OPTジェットと従来工法の注入率比較

工 法 名		呼 称	設計 有効径 ϕD (m)	造成 時間 t (分/m)	噴射量 (l/分)		注 入 率 β (%)
					硬化材 V_c	切削水 V_w	
OPT ジェット	低排泥低変位 噴射攪拌工法	OPT-1	3.5	9	300	50	32.7
		OPT-1	2.5	4	300	50	28.5
		OPT-2	2.0	5	200	50	39.8
従来工法	大口径噴射攪 拌工法	A	3.5	15	300	50	54.6
		B	3.5	12	400	—	49.9
	エア硬化材噴 射工法	—	1.6	30	60	—	89.5
		エア水硬化材 噴射工法	—	2.0	16	180	70

注) 注入率 β は、砂質土 $N \leq 30$ の施工仕様条件で比較している。

るものであるため、室内配合試験による事前の強度確認を基本としている。

なお設計強度は、室内配合試験の一軸圧縮強度を材料安全率 $f_m = 1.5$ で除して設定する。

3.3 排泥発生量比較

改良体造成時の排泥発生量は、式(2)と式(3)に示すように設計有効径から求められる改良体積 V_i と総噴射量 $(V_c + V_w)$ の比で定義する注入率 β 、および改良対象地盤の土量変化率 L_j の和に比例して大きくなる。したがって、噴射攪拌工法ではこの注入率を小さくできるほど排泥量がより少なくなるため、環境負荷が小さく自然に優しいものとなる。

$$V_m = V_i \times \chi \dots (2)$$

$$\chi = \beta / 100 + L_j - 1 \dots (3)$$

$$\beta = (V_c + V_w) / V_i \times 100 \dots (4)$$

$$L_j = V_L / V_i \dots (5)$$

ここに、 V_m ：排泥発生量 (m^3)

V_i ：設計有効径 ϕ_d による改良体積

$(= \pi \phi_d^2 / 4 \times L \times n, \text{m}^3)$

χ ：排泥率（単位改良体積当りの排泥量）

β ：注入率 (%)

V_c ：硬化材噴射量 (m^3)

V_w ：水噴射量 (m^3)

L_j ：ジェット切削による土量変化率

(砂質土： $= 1.05$ 、粘性土： $= 1.15$)

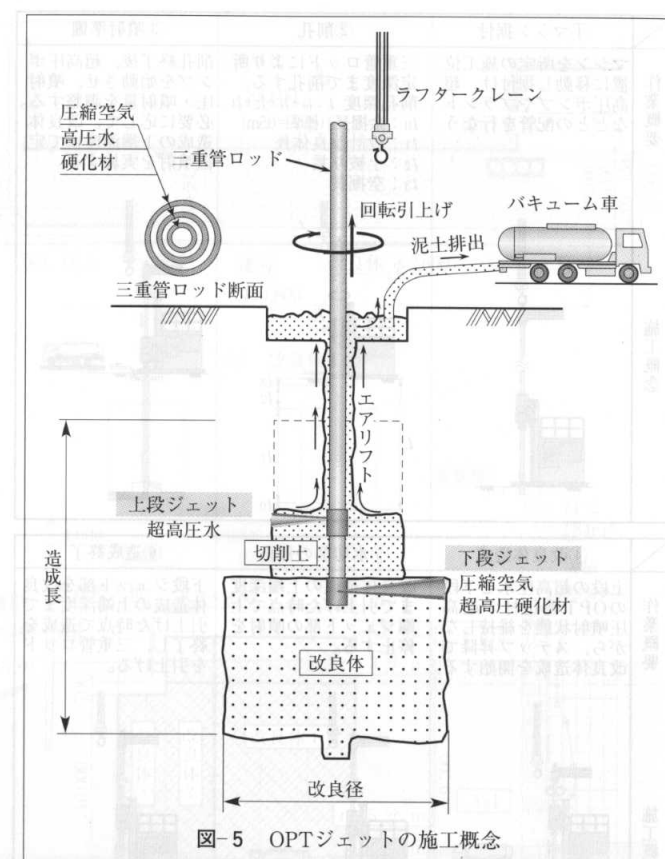


図-5 OPTジェットの施工概念

V_L ：ジェット切削土量（ほぐした土量）

表-4には、OPTジェットと従来工法の注入率比較を示す。同表より、OPTジェットの注入率 β は約29～40%程度となり、従来工法に比べて総噴射量に対する排泥発生量を約30～70%低減することが可能となっている。

4. 標準施工法

OPTジェットの施工概念を図-5に示す。また、標準的な改良体造成の施工手順を図-6に示す。改良体造成の標準的な作業サイクルを図-7に示す。

改良体造成のはじめには、準備工として作業用足場を構築して、その上で施工予定の改良体中心にボーリングロッドが重なるようにOPTマシンを据付け、超高压ポンプやプラントの配管系統を接続する。ボーリングロッド周囲には造成用の排泥溜りを造り、削孔水を吐出しながら削孔を開始する。削孔は、設計改良体長から下部の余掘り部までを行なう。削孔終了後には超高压ポンプを稼働させ、下段噴射のOPT硬化材が所要の圧力になるまで最下端でアイドリングする。

次段階の改良体造成は、硬化材噴射中の超高压ポンプで所要圧力と流量が得られたら開始し、改良体下端より25mmのステップ昇段で所要造成時間を保持しながら改良体上端まで引上げる。造成に伴い排泥溜りの排泥液が増加するため、随時バキューム車などで吸引し、それを産業廃棄物処分場に運搬する。

改良体造成終了後には、三重管ロッドをクレーンで引き上げ作業を終了する。

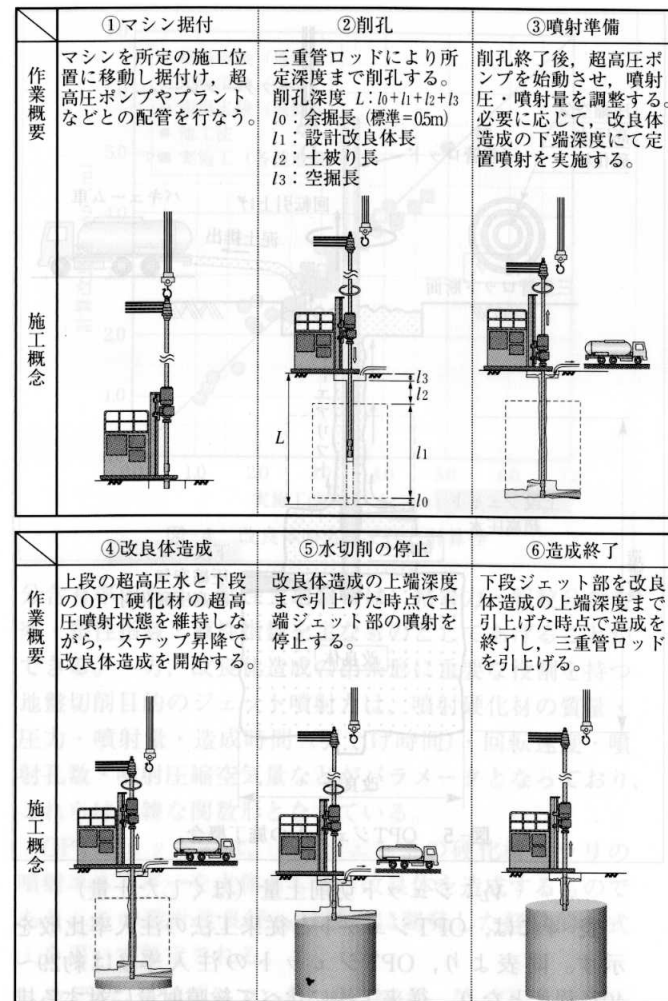


図-6 改良体造成の施工手順

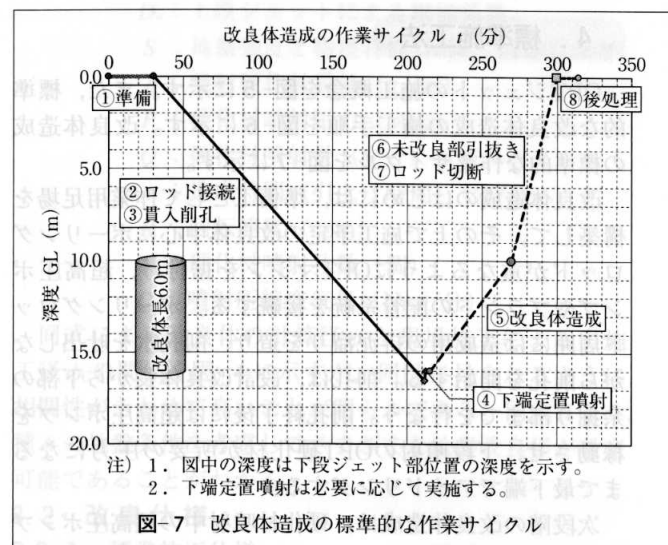


図-7 改良体造成の標準的な作業サイクル

5. 適用事例

5.1 工事概要

本工事は、臨海部に立地した稼働中の工場内建築物の地震時液状化時の側方流動による被害抑止を目的に、固化改良工法としてOPTジェット工法を採用したものである。

表-5 試験施工仕様と施工結果

ケース名	仕様タイプ	造成時間 t (分/m)	硬化材	改良径 ϕ_D (m)		強度 q_u (MN/m ²)	
				計画	実施工	計画	実施工
CASE1	OPT-2	3	OP1号	2.0	3.4	0.2	>1.0
CASE2	OPT-2	5	OP1号	2.5	>3.5	0.2	>1.0
CASE3	OPT-2	5	OP2号	2.5	>3.5	0.2	>0.75
CASE4	OPT-2	7	OP1号	2.5	3.6	0.2	—

当該建築物の海側護岸は約80年前に建造されたものであり、地盤も液状化しやすい砂地盤であった。このため、建築物の護岸側において地震時の液状化による側方流動を抑止する必要があった。対策工事の目的は、地盤改良体による剛体ブロック構造を築造し、この抑止効果によって事業継続性の向上を図ることである。

5.1.1 地盤条件

当該地の地盤条件は、上層より埋土層F ($N \approx 8$) が $t = 3$ m厚、沖積砂質土層As1 ($N \approx 15$, $N_{max} = 26$) が $t = 11$ m厚、沖積粘性土層Ac1 ($N \approx 3$) が $t = 4$ m厚、Ac2 ($N \approx 2$) が $t = 13$ m厚で堆積していた。F層は、平均で自然含水比 $w_n = 23\%$ 、細粒分含有率 $F_c = 29\%$ であり、シルト分含有率が多いところもあり、粒度のばらつきが大きい状態である。As1層は、平均で自然含水比 $w_n = 30\%$ 、細粒分含有率 $F_c = 27\%$ であるが、砂分含有率が74%であり、F層に比べて砂分が10%程度多い。この地層はシルト・粘土を挟んで、これも土性のばらつきが大きい状態である。Ac1層は、平均で自然含水比 $w_n = 45\%$ でほぼ液性限界近くにあり、細粒分含有率は $F_c = 87\%$ である。一軸圧縮強度は、 $q_u = 117 \text{ kN/m}^2$ と比較的大きかった。

5.1.2 改良体の工事諸元

- ・改良強度 $q_u = 0.3 \text{ MN/m}^2$
- ・改良率 $\alpha = 78.5\%$
- ・改良体① $\phi 2.6 \text{ m} \times L 12.2 \text{ m} \times 105 \text{ 本} = 6,801 \text{ m}^3$
- ・改良体② $\phi 2.6 \text{ m} \times L 13.2 \text{ m} \times 39 \text{ 本} = 2,733 \text{ m}^3$
- ・改良体③ $\phi 2.6 \text{ m} \times L 10.0 \text{ m} \times 41 \text{ 本} = 2,177 \text{ m}^3$
- ・総改良体積 $V = 11,711 \text{ m}^3$

5.2 工事内容

5.2.1 試験施工

当該工事対象のAs1層の地盤条件は、前述のように細粒分が挟在した砂質土層でばらつきが大きく、OPTジェットの改良径 ϕ_D が計画に対してばらつき可能性があった。このため、本施工実施に当たり試験施工を行なった。

表-5には試験施工の施工仕様と施工結果を示す。同表の実施工の改良径確認は頭部掘出しによって実施した。改良強度確認は計画改良径-D/8の位置で2週強度で実施した。同表から明らかなように、計画に対して十分な改良径と強度が確認された。なお、写真-1には改良径確認状況、写真-2には改良体コアの目視確認状況の1例を示す。写真-2のコアに赤色の部分があるが、これはフェノールフタレインによるセメント分の確認を実施したためのものである。

試験施工結果から、これを反映して液状化対策工の設計を安全側に見直し、本施工においては次のように施工

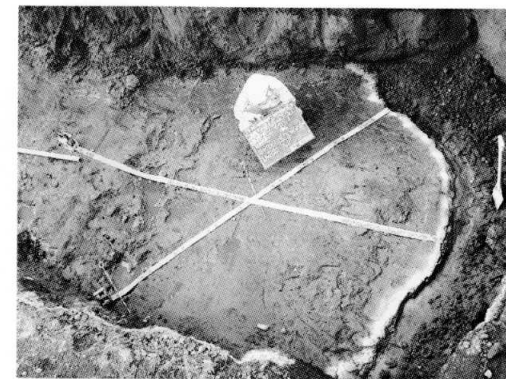


写真-1 改良径確認状況

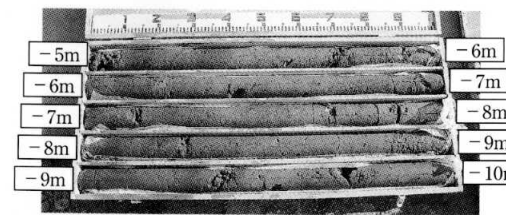


写真-2 改良体コアの目視観察状況

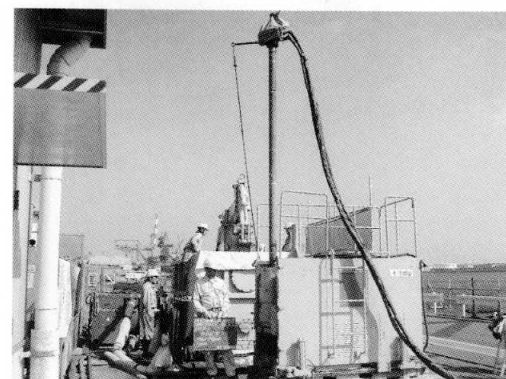


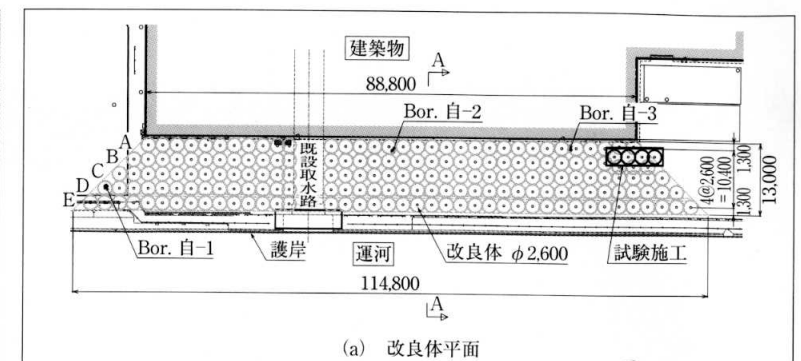
写真-3 OPTジェット施工状況

仕様を設定した。

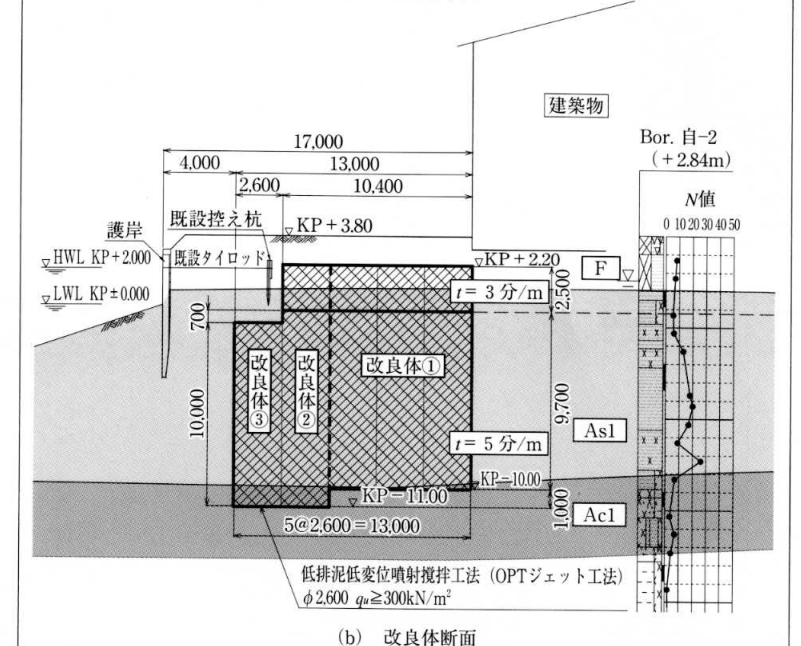
- ・改良強度 $q_u = 0.2 \text{ MN/m}^2 \Rightarrow q_u = 0.3 \text{ MN/m}^2$
- ・改良径 $\phi_D = 2.5 \text{ m} \Rightarrow \phi_D = 2.6 \text{ m}$
- ・造成時間 上部 $L = 2.5 \text{ m} \Rightarrow t = 3 \text{ 分/m}$
下部 $L = 9.7 \sim 10.7 \text{ m} \Rightarrow t = 5 \text{ 分/m}$

5.2.2 本施工

本施工における改良体配置を図-8に示す。施工状況を写真-3に示す。強度確認結果は、4週強度の供試体平均で $q_u \approx 1.7 \text{ MN/m}^2$ であり、変動係数は $c_v \approx 34\%$ であった。全試験体は十分に計画強度を上回るものであった。なお、当該工事における注入率は約 $\beta = 24\%$ 、排泥率は約 $\chi = 30\%$ であり、これから類推するとジェット切削による土量変化率は $L_f = 1.06$ であった。また、これを従来工法で一般に用いられている噴射量に対する排泥増



(a) 改良体平面



(b) 改良体断面

図-8 OPTジェットの改良体配置

加比を求めて見ると、約25%程度となっていた。

6. おわりに

本報文では、新たに開発したOPTジェットの技術内容と適用事例について報告し、本工法が従来工法に比較して、高速施工性・低排泥性・経済性において、優位性が見られることを明らかにした。OPTジェットの適用により、今後は新設構造物や既設構造物を対象にした地盤強化がより、合理的に実施できるものとする。

本工法については、新技術としてより発展できるように、これからも各種のデータを取得して、工法の客観的な評価と検証を継続して行きたいと考える。

参考文献

- 1) OPTジェット研究会：低排泥低変位噴射攪拌工法「OPTジェット工法」技術・積算資料、2009年3月。