

# 低排泥低変位噴射攪拌工法「OPT ジェット工法」

—噴射攪拌工法の高速度施工技術—

川崎 廣貴・飯泉 勝・藤井 誠司・藤澤 伸行

土木構造物の老朽化対策や液状化防止による耐震性向上の観点から既設構造物の地盤強化対策が求められている。一方、これら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・施工計画にあた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化が重要である。このため、既存技術をブレイクスルーした技術として、新開発の噴射ヘッドと独自の噴射攪拌理論を用いて、高速度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（ $\phi 1.3 \sim \phi 3.5 \text{ m}$ ）を効率的に造成できるようにし、経済性が優れるものとした低排泥低変位噴射攪拌工法「OPT ジェット工法」を開発し、実工事に展開している。

ここでは、初めに、OPT ジェット工法の概要と特長を述べ、次に改良仕様について説明する。最後に、適用事例として臨海部の液状化対策として実施した工事内容について報告する。

キーワード：地盤改良，地盤強化，耐震性向上，液状化対策，噴射攪拌工法，高速度施工，低排泥，低変位

## 1. はじめに

地盤改良による対策技術で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、セメントなど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る。

固化改良工法における各工法コストは、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、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、我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、新開発の噴射ヘッドと独自の噴射攪拌理論を用いて、高速度施工により低排泥と低変位を実現

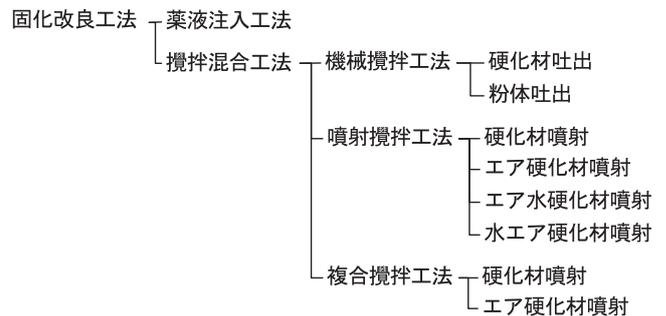


図-1 固化改良工法の分類

したものである。

ここでは、噴射攪拌工法の高速度施工技術を副題として、最初にOPT ジェットの概要と特長などを述べ、次に改良仕様について説明する。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液状化対策の工事内容について報告する。

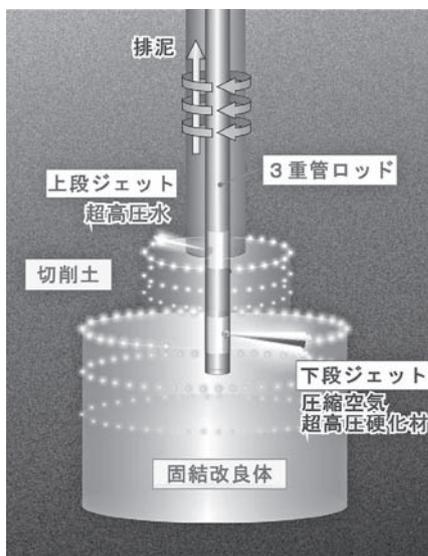
## 2. OPT ジェットの概要

### (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。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

時間も掛かっていたため、排泥量も多いという課題があった。このため、従来工法は、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、図一2に示すように三重管構造のロッドを使用して超高压水・圧縮空気・超高压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と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、大口径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。



図一2 OPT ジェットの工法概念

(2) 特長

(a) 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。

(b) 低排泥・低変位の実現

高速施工採用で改良径体積に対する水と硬化材スラリの総噴射量が20~50%程度と少量になり低排泥化に成功した。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。

(c) 幅広い改良径選択による合理化

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たことにより、改良対象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。

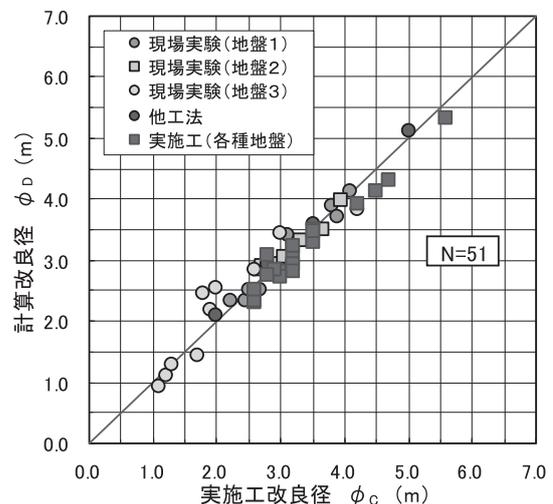
3. 工法理論

OPT ジェットの設計改良径は、施工対象地盤の地盤条件やジェット噴射力に依存する。本工法は、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るため、この設計改良径 $\phi_D$ は独自に開発した経験的な式(1)を用いて算定できる。

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

- 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)
- $\rho$  : 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 ( $l/分$ )
- $t$  : 造成時間 (引上げ時間) ( $分/m$ )
- $R$  : 回転速度 (rpm)
- $N$  : 硬化材噴射孔数 (個)
- $Q_a$  : 噴射圧縮空気量 ( $Nm^3/分$ )

同式による改良径の計算径 $\phi_D$ と現場施工による実施工径 $\phi_C$ の関係を図一3に示すが、相関性が極めて高いことが明らかであり、種々の地盤条件を考慮して、様々な地盤改良径が設定可能であることが分かる。



図一3 改良体の実施工径と計算径

4. 改良仕様

OPT ジェットは、表一1に示すOPT-1~OPT-3の3種類の施工タイプを設けている。

これに基づく、標準的な設計有効径 $\phi_D$ を表一2に示す。改良対象地盤において砂質土で最大N値を、

表一 1 施工改良体積と標準施工仕様

タイプ			OPT-1	OPT-2	OPT-3	
施工改良体積 V の目安			(m <sup>3</sup> )	≥1,000	<1,000	<300
上 段 ジェット	切削水	圧 力 (MPa)	40	40	40	
		噴射量 (ℓ/分)	50	50	50	
下 段 ジェット	硬化材	圧 力 (MPa)	40	40	30	
		噴射量 (ℓ/分)	300	200	100	
	圧縮空気	圧 力 (MPa)	1.05	1.05	1.05	
		噴射量 (Nm <sup>3</sup> /分)	4~16	4~16	4~16	

表一 2 標準設計有効径 φ<sub>D</sub> (m)

タイプ	施工改良体積 V (m <sup>3</sup> )	造成時間 t (分/m)	砂質地盤 N 値			粘性土地盤 粘着力 c (kN/m <sup>2</sup> )		
			N ≤ 30	N ≤ 50	N ≤ 70	c ≤ 25	c ≤ 35	c ≤ 50
OPT-1	≥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	—	—

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、この他に砂地盤の N 値が N ≤ 20 の液状化対策用の施工仕様も工法マニュアルで設定しているが、ここでは割愛する。

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一 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。

表一 3 改良体強度の目安

硬化材の種類	土質	設計強度 q <sub>u</sub> (MN/m <sup>2</sup> )	粘着力 c (MN/m <sup>2</sup> )	付着力 f (MN/m <sup>2</sup> )	曲げ引張強さ σ <sub>t</sub> (MN/m <sup>2</sup> )	変形係数 E <sub>50</sub> (MN/m <sup>2</sup> )
OP1 号	砂質土	2.0	1.0	1/3c	2/3c	400
	粘性土	1.0	0.5			200
OP2 号	砂質土	0.5	0.25	1/3c	2/3c	100
	粘性土	0.2	0.1			40

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、OP 1 号を適用することを標準とする。OP 2 号は、液状化対策用に使用する。

### 5. 排泥発生量比較

改良体造成時の排泥発生量は、式 (2) に示すように設計有効径から求められる改良体積 V<sub>i</sub> と総噴射量 (V<sub>c</sub> + V<sub>w</sub>) 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<sub>j</sub> 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単位改良体積あたりの排泥量がより少なく

なるため、環境負荷が小さく、経済性に優れたものとなる。

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

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

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

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

ここに、V<sub>m</sub> : 排泥発生量 (m<sup>3</sup>)

V<sub>i</sub> : 設計有効径 φ<sub>D</sub> による改良体積  
(= π φ<sub>D</sub><sup>2</sup> / 4 × L × n, m<sup>3</sup>)

χ : 排泥率 (単位改良体積当りの排泥量)

β : 注入率 (%)

V<sub>c</sub> : 硬化材噴射量 (m<sup>3</sup>)

V<sub>w</sub> : 水噴射量 (m<sup>3</sup>)

L<sub>j</sub> : ジェット切削による土量変化率  
(砂質土 : = 1.05, 粘性土 : = 1.15)

V<sub>L</sub> : ジェット切削土量 (ほぐした土量)

表一 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。

表一 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 φ <sub>D</sub> (m)	造成時間 t (分/m)	噴射量 (ℓ/分)		注入率 β (%)
					硬化材 V <sub>c</sub>	切削水 V <sub>w</sub>	
OPT	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	0	49.9
	エア硬化材噴射工法	—	1.6	30	60	0	89.5
	エア水硬化材噴射工法	—	2.0	16	180	70	127.3

注) 注入率 β は、砂質土 N ≤ 30 の施工仕様条件で比較している。

### 6. 適用事例

ここでは、OPT ジェット工法を臨海部立地工場の地震時液状化による側方流動抑止目的に適用した 2 工事例について報告する。

#### (1) 工事例 1<sup>2)</sup>

当該地の地盤条件は表一 5 に、改良体の工事諸元は表一 6 に示す通りである。

本施工に当り、事前に試験施工を行った結果を表一 7 に示す。施工の改良径確認は、写真一 1 に示すように頭部掘出しによって実施した。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。

表一五 地盤条件

土層	下端深度 (- m)	N 値	一軸強度 $q_u$ (kN/m <sup>2</sup> )
F層	3.0	8	—
A <sub>s1</sub> 層	14.0	8~26	—
A <sub>c1</sub> 層	18.0	3	117
A <sub>c2</sub> 層	31.0	2	—

表一六 改良体の工事諸元

項目	単位	諸元
仕様タイプ	—	OPT-2
硬化材	—	OP2号
改良強度 $q_u$	MN/m <sup>2</sup>	0.3
改良径 $\phi_D$	m	2.6
改良本数 n	本	185
平均改良長 L	m	11.9
総改良体積 V	m <sup>3</sup>	11,711
改良率 $\alpha$	%	78.5



写真一 二 OPT ジェット施工状況

表一七 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 $\phi_D$ (m)		強度 $q_u$ (MN/m <sup>2</sup> )	
				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	—



写真一 一 改良径確認状況

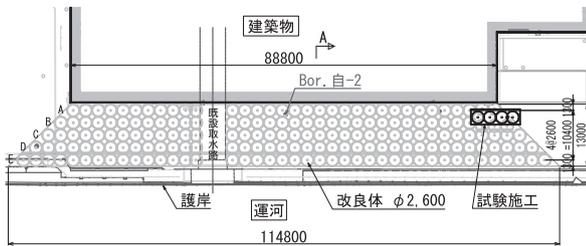
本施工における改良体配置を図一四に、施工状況を写真一 二に示す。強度確認結果は、4週強度の供試体平均で  $q_u \approx 1.5 \text{ MN/m}^2$  であり、変動係数は  $c_v \approx 34\%$  であった。全試験体は十分に計画強度を上回るものであった。

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  $L_j = 1.06$  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加比を求めて見ると、約 25% 程度となっていた。

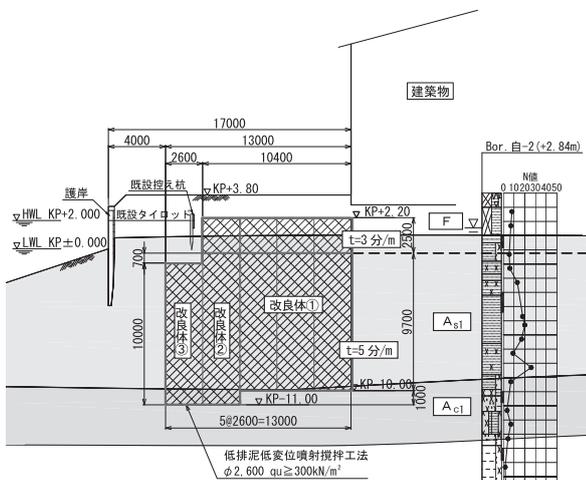
(2) 工事例 2

当該地の地盤条件は表一八に、改良体の工事諸元は表一九に示す通りである。

本施工に当り、事前に試験施工を行った結果を表一 一〇に示す。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。この結果を反映し



(a) 改良体平面



(b) 改良体断面

図一四 工事例 1 の改良体配置

表一八 地盤条件

土層	下端深度 (- m)	N 値	一軸強度 $q_u$ (kN/m <sup>2</sup> )
F層	2.5	3~10	—
A <sub>s1</sub> 層	12.0	3~20	—
A <sub>c1</sub> 層	4.5	2	173
A <sub>c2</sub> 層	3.0	10	—

表一九 改良体の工事諸元

項目	単位	諸元
仕様タイプ	—	OPT-1
硬化材	—	OP2号
改良強度 $q_u$	MN/m <sup>2</sup>	0.5
改良径 $\phi_D$	m	3.4
改良本数 n	本	95
平均改良長 L	m	14.6
総改良体積 V	m <sup>3</sup>	12,575
改良率 $\alpha$	%	78.5

表一 一〇 試験施工仕様と施工結果

(a) 砂質土 (N=10)

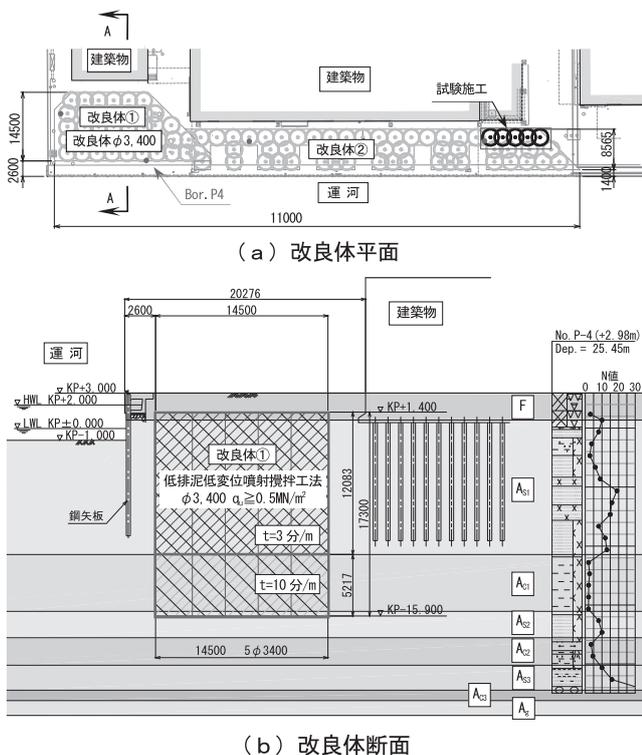
ケース名	仕様タイプ	造成時間 t (分/m)	硬化材	改良径 $\phi_D$ (m)		強度 $q_u$ (MN/m <sup>2</sup> )	
				計画	実施工	計画	実施工
CASE01	OPT-1	2	OP2号	2.6	2.9	0.5	0.5
CASE02	OPT-1	3	OP2号	3.0	3.4	0.5	1.1
CASE03	OPT-1	4	OP2号	3.3	3.7	0.5	1.9

(b) 粘性土 (c=80kN/m<sup>2</sup>)

ケース名	仕様タイプ	造成時間 t (分/m)	硬化材	改良径 $\phi_D$ (m)		強度 $q_u$ (MN/m <sup>2</sup> )	
				計画	実施工	計画	実施工
CASE11	OPT-1	5	OP2号	1.6	2.2	0.5	0.6
CASE12	OPT-1	7	OP2号	2.1	2.7	0.5	1.2
CASE13	OPT-1	10	OP2号	2.6	3.4	0.5	1.9

て液状化対策工の設計を見直し、本施工の施工仕様を表一9のように改良径 $\phi_D = 3.4\text{ m}$ が得られるように設定した。

本施工における改良体配置を図一5に示す。強度確認結果は、砂質土改良体の供試体平均で $q_u \approx 1.1\text{ MN/m}^2$ であり、変動係数は $c_v \approx 35\%$ 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。



図一5 工事例2の改良体配置

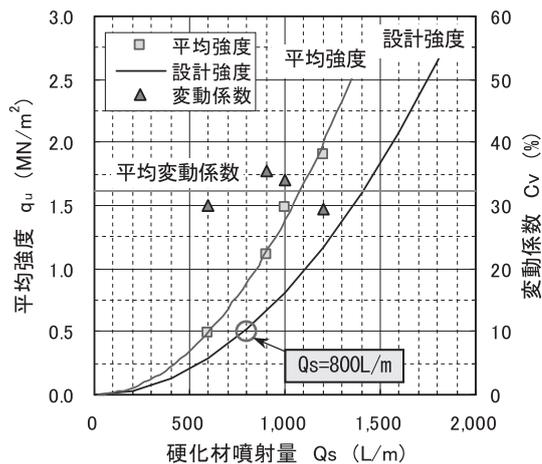
### (3) 設計強度の考察

前述2工事の施工結果から、改良体平均強度と単位造成長当りの硬化材噴射量 $Q_s$ の関係を図一6に示すように整理した。同図から明らかなように改良体強度は、砂質土・粘性土ともに硬化材噴射量と高い相関性が見られる。なお、同図には平均変動係数 $c_v$ も示しているが、変動係数は硬化材噴射量との相関が見られず、 $c_v = 20 \sim 35\%$ の範囲にばらついた状態となった。

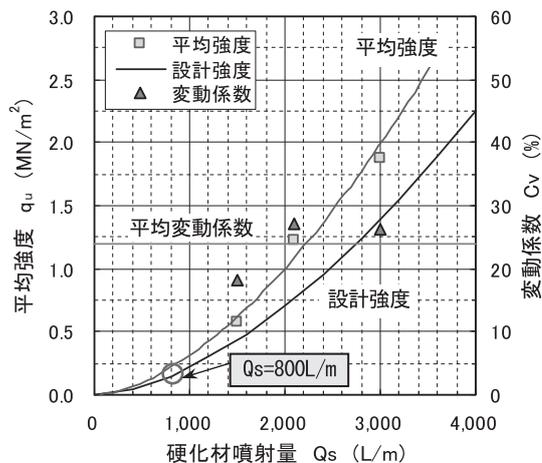
同図には、同時に強度のばらつきを考慮した信頼度90%の設計強度曲線を示している。これから、表一3に示した硬化材OP2号の設計強度を満足できる硬化材噴射量 $Q_s$ は、砂質土・粘性土ともに $Q_s = 800\text{ L/m}$ 以上が必要であることが分かる。

### (4) 注入率の考察

前述2工事の施工結果を基にした、注入率実績を表一11に示す。硬化材注入率 $\beta_c$ は、単位造成長当りの硬化材噴射量 $Q_s$ を改良体積で除したものである。



(a) 砂質土 (N=10)



(b) 粘性土 (c=80kN/m<sup>2</sup>)

図一6 強度と噴射量

表一11 OPT ジェットの注入率実績

OPT 仕様タイプ	地盤条件	設計有効径 $\phi_D$ (m)	造成時間 t (分/m)	硬化材噴射量 $V_c$ (ℓ/分)	硬化材注入率 $\beta_c$ (%)
OPT-2	砂質土 N=15	2.6	5	200	18.8
OPT-1	砂質土 N=10	3.4	3	300	9.9
OPT-1	粘性土 c=80kN/m <sup>2</sup>	3.4	10	300	33.0

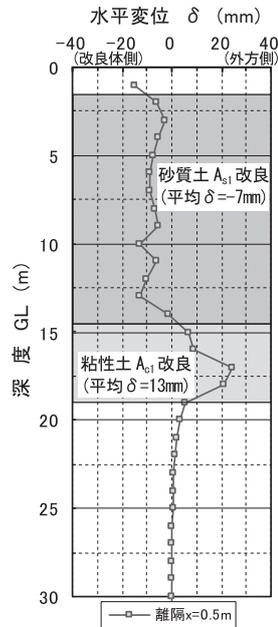
同表から明らかなように注入率は、砂質土で $\beta_c = 10 \sim 20\%$ 、強度の大きい粘性土では $\beta_c = 30\%$ 程度になることが分かる。この結果から、OPT ジェットは、表一4に示した従来工法に比べて合理的に改良体が造成できることが明らかである。

### (5) 地盤変位影響の考察

工事例2では、改良体施工時に地中傾斜計によりOPT ジェット施工に伴う地盤変位影響を計測した。計測位置は、改良体外径から離隔0.5 mである。

改良体施工直後の地盤変位を図一7に示す。同図から明らかなように、下部粘性土 $A_{c1}$ 層では外側に平均13 mm、それより上部の砂質土 $A_{s1}$ 層では内側に平均7 mm程度の水平変位が発生した。 $A_{c1}$ 層の変位

は、自立性が高くN値でいえば砂質土より軟い粘性土が噴射圧力で外方に押し出されたものであると考える。A<sub>sl</sub>層の変位は、A<sub>sl</sub>層がA<sub>cl</sub>層より硬く外方変位が小さかったものが、施工直後の改良体領域が硬化材スラリー混合の泥土状態で、土水圧の水平圧力バランスが不均衡になっているため、この影響により、若干の改良体側への内縮変位が生じたものとする。



図一七 施工後の地盤変位

これらの結果から、OPT ジェットによる地盤変位影響は、離隔 0.5 m での近接状態においても、極めて小さいものであることが明らかとなった。

## 7. おわりに

噴射攪拌工法や機械攪拌工法が世の中に誕生してから約 40 年が経過し、この間、攪拌混合工法は建設需要と共にさまざまに改良され、種々の工法が開発されてきた。土木構造物の新規プロジェクトが減少する中で、今後は構造物の維持更新に際し、補強対策が容易で経済的な工法が求められるものとする。

ここでは、新開発の OPT ジェット工法の技術内容と適用事例について報告し、本工法が従来工法と比較して、高速施工性・低排泥性・経済性・低変位性において、優位であることを明らかにした。OPT ジェットの適用により、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。

今後とも、本工法をより発展させて経済的なものとなるように、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。

JCM A

### 【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4月
- 2) 川崎, 飯泉, 藤井, 藤澤: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 ジェット工法」の開発と適用—, 基礎工 Vol.37, No.5, 2009年5月

### 【筆者紹介】



川崎 廣貴 (かわさき ひろたか)  
清水建設株  
土木技術本部基盤技術部  
担当部長



飯泉 勝 (いづみ まさる)  
清水建設株  
土木横浜支店土木部  
工事主任



藤井 誠司 (ふじい せいじ)  
清水建設株  
土木技術本部技術計画部  
課長



藤澤 伸行 (ふじさわ のぶゆき)  
ライト工業株  
生産事業本部  
副本部長