

# 水平方向への地盤改良技術

沼田 佳久<sup>\*1</sup>・中根 淳<sup>\*1</sup>・永岡 高<sup>\*2</sup>

<sup>1</sup> 正会員 鉄建建設(株)エンジニアリング本部技術センター(〒286-0825 千葉県成田市新泉9-1)

<sup>2</sup> 正会員 鉄建建設(株)エンジニアリング本部(〒101-8366 東京都千代田区三崎町2丁目5-3)

既設構造物の直下や大深度での地盤改良を地上から行うには、設備の特殊化・大型化、削孔長の長大化など、施工性や経済性の点で課題を残してきた。そこで、従来の鉛直方向からの空気併用型二重管方式による高圧噴射攪拌技術を基にして、円筒形(φ2000)の改良体を水平方向へ造成できる地盤改良工法(ラテラルジェット工法)を開発した。今回、本工法により、開削工事に伴う鉄道高架橋橋脚基礎の変状防止および横断する地下構造物直下の土留め欠損部の防護を目的とした地盤改良を施工した。これにより、開削工事期間における既設構造物の変状を管理値以内に抑えることができ、当初の目的を果たすことができた。ここでは、現場試験施工から本施工に至るまでの経緯について報告する。

**キーワード：**地盤改良，高圧噴射攪拌，水平施工，構造物直下

## 1. はじめに

近年、都市部の地下には多種多様な構造物が構築され、新たな構造物を設けるには既設構造物に近接する箇所や障害物の少ない大深度地下が対象となる。このような状況下において、地盤改良技術は工事施工を効率的に進める上で有効な手段となる。しかし、既設構造物の直近や基礎部および地下深い位置での地盤の固結改良では、従来のような地上からの施工方法では、設備の特殊化・大型化、および削孔長の長大化を招くなど、施工性、経済性の点で新たな改良技術が望まれてきた。

そこで、筆者らは、地上からではなく、より近い位置から地盤改良を施工できる方法として、作業用の立坑や既設構造物の内部を利用し、水平方向に高圧噴射攪拌による円筒形(φ2000)のセメント改良体を造成できる「ラテラルジェット工法(L-JET工法)」の開発に取り組んできた。そして、これまでに、造成システムを構成する各要素の機能確認試験、各要素を統合した一連のシステムによる施工確認試験などを実施し、水平方向への改良体の造成が可能であることを実証してきた<sup>1)2)3)</sup>。

本工法による最初の施工は、近接する鉄道高架橋の変状防止、および地下埋設構造物の直下の土留め欠損部の防護を目的とした地盤改良であった。施工に先立ち、対象となる地盤材料に適した造成時の施工仕様と硬化材の配合を決定するため現場試験施工を実施し、さらに造成時に生じる改良部の内部圧力による鉄道高架橋や土留め支保工の安定性についての検討を行った。

本報文では、これらの検討事項の内容と施工結果について報告する。

## 2. 工法概要

本工法は、従来の鉛直方向からの空気併用型二重管方式による高圧噴射攪拌技術を基に、水平方向に同様な地盤改良が行えるように、新たな要素技術を加えて開発した工法である。図-1は、造成時における基本的な機構を示したものである。本システムは、造成管および排泥管をそれぞれ専用の管として分離した点に大きな特徴を有しており、各管は自穿孔により上下方向に所定の間隔で設置する。改良体は、造成管を中心として圧縮空気を伴った硬化材を半径方向へ超高压(40MPa)で噴射しながら造成管を回転させ、地盤を切削するとともに攪拌混合を行うことで造成されるものである。その際、硬化材、切削土から成るスライムおよび改良部の上方に滞留する空気は、改良部の内部圧力によって造成管の真上に位置する排泥管を通じて外部へと押し出されるように排出される。この超高压による硬化材の吐出とスライムの排出

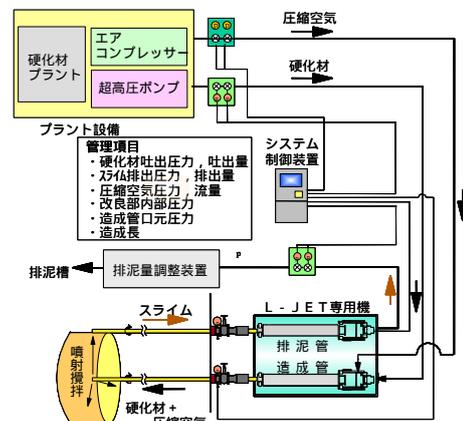


図-1 施工システム図

を連続したシステムとして稼働させながら、造成管および排泥管を一定の速度で引き抜くことにより、造成管と排泥管の間隔を半径とした円筒形の改良体を水平方向へ造成することが可能となる。なお、排泥管を通じて排出されるスライムは、外部に設けた排泥量調整装置へと送り込まれ、排出量を硬化材の吐出量と釣り合うように制御する。このようにして、硬化材の吐出量と排泥量の収支を一定にすることで、改良部の内部圧力は改良位置における初期土圧力と釣り合い、周辺地盤への影響が抑制される。

このシステムにより、本工法は、既設構造物の直近や真下、近接構造物の防護、シールドの発進・到達部の防護などへの地盤改良に適用することが可能となった。

### 3. 試験施工

施工に先立ち、現場の敷地内に設けられた立坑を利用して試験施工を実施し、現地の地盤材料に適した施工仕様と硬化材の配合を決定することとした。

#### (1) 施工概要

試験施工は、GL-6.5m(Case1)、GL-5.0m(Case2)を中心として長さ3.0m、直径2.0mの円筒形の改良体を上下に造成するもので、厚さ45cmのラップ領域を設けた。また、図-2に示すように、改良対象となる地盤を、Case1ではN値0の軟弱なシルト層とし、Case2ではN値12程度の軽石混じりの緩い砂層とした。地下水位はGL-1.0mであった。

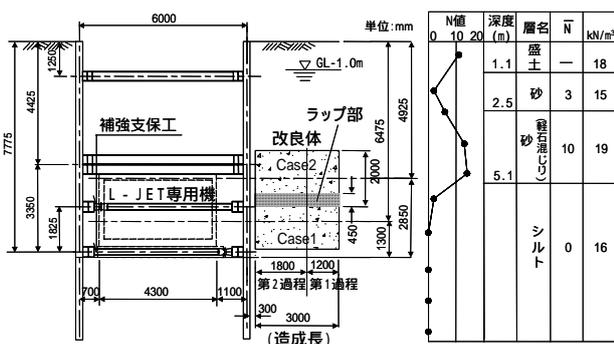


図-2 試験施工断面と地盤の物性値

表-1 施工仕様

		Case 1		Case 2		
		第1過程	第2過程	第1過程	第2過程	
造成	硬化材	吐出量 (ℓ/min)	100	100	100	100
		圧力 (MPa)	40	40	40	40
	圧縮空気	流量 (m <sup>3</sup> /min)	1.9	0.9	1.2	1.0
		圧力 (MPa)	0.7	0.7	0.7	0.7
	引抜き速度 (min/m)	20	20	20	30	
排泥	排泥量 (ℓ/min)	90 ~ 130	90 ~ 170	100 ~ 180	100 ~ 180	

造成は、原地盤の改良に適した施工仕様を見出すため、表-1に示すように各ケースの造成過程毎に施工仕様である圧縮空気量、排泥量、引き抜き速度、を変えて実施した。造成時には、各施工仕様の項目に加えて改良部の内部圧力、切梁の軸力、土留め壁の変位について計測を行った。なお、硬化材の配合は、事前に採取した地盤材料を用いて室内配合試験を行い、スライムの排出に必要な流動性の確保と砂質土(2.5MN/m<sup>2</sup>; 28日)および粘性土(1.0MN/m<sup>2</sup>; 28日)の標準強度(一軸圧縮強さ)を基準とした。

#### (2) 試験結果

造成時に供給する圧縮空気量は、一般に高圧噴射による切削エネルギーの大小や、内部圧力の変動に影響することが指摘されている<sup>4)5)</sup>。Case1、2では、共に第1、第2造成過程における圧縮空気量を変えて出来形への影響を比較した。確認された改良体の範囲を図-3に示す。圧縮空気量を減じた第2造成過程では、各Caseとも第1過程よりも改良範囲は狭くなり、改良率(推定面積/計画面積(2.0m))ではCase1が5.1%、Case2が14.7%程度の減少率を示し、所要の改良域を下回る結果となった。このように圧縮空気量の変化は、改良体の出来形に顕著に反映しており、所定の改良域を造成するには適切な空気量を、事前の試験や過去の経験などから把握しておく必要がある。ここでは、両試験Caseより圧縮空気量を0.7MPaの圧力で吐出量を1.1~1.4m<sup>3</sup>/minの範囲で調整すれば良いことがわかった。また、各Caseの第1造成過程の施工仕様による出来形を良好な改良状態と見なすと、軟弱なシルト層(Case1)では2.0m、

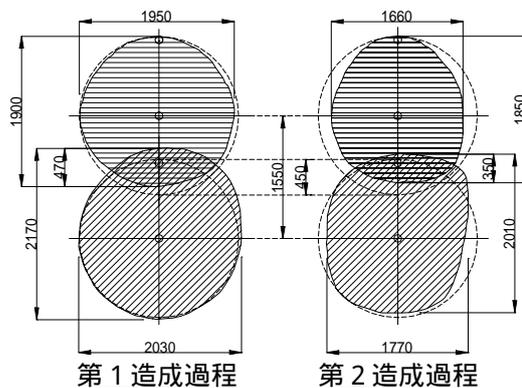


図-3 改良体の出来形



写真-1 水平コアサンプリング結果

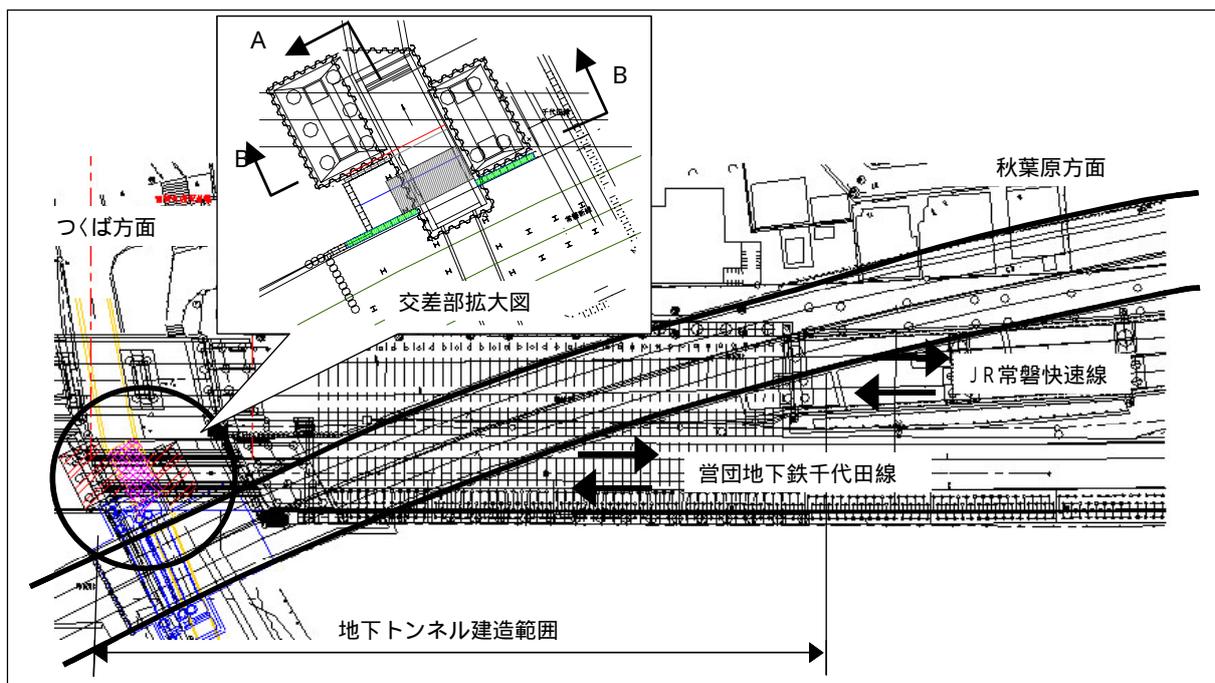


図-4 現場平面図

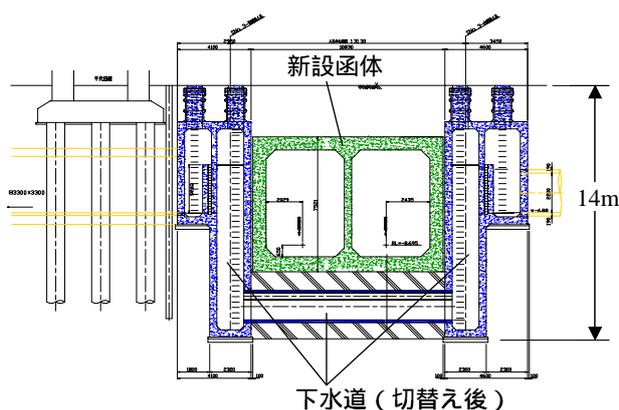


図-5 下水管切り替え図 (A - A断面)

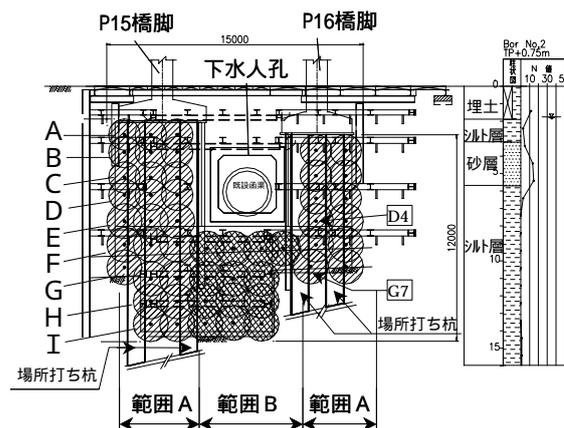


図-6 地盤改良断面図 (B - B断面)

砂層 (Case2) では 1.8m程度が本工法にとって 妥当な改良径であると判断した。

写真-1 は、結果が良好であった第1造成過程の 範囲において、鉛直方向からサンプリングしたコアの 状態を示したものである。想定した改良域は、概ね硬化材による攪拌混合がなされており、ラップ領域も一体化した改良がなされていた。コアの平均圧縮強度は  $3.38\text{MN/m}^2$  と、砂質土および粘性土の各標準強度を満足する結果であった。よって、本施工で用いる硬化材は、この配合を基本とした。

## 4. 本施工

### (1) 現場概要

工事目的は、JR常磐線と営団地下鉄(地上区

間)の下をくぐる、延長172.5mの函体を構築するものである。図-4に現場平面図を示す。工事区間の内、高架橋範囲の施工手順は、図-5に示すように、開削工法によって地盤を深さ約14mまで掘り下げて、函体築造範囲を横断する下水道をサイフォン形式に切り替えた後に函体を築造するものである。

下水道の切り替え工事に際し、掘削範囲が、隣接する営団線高架橋橋脚の間際にまで及ぶことから橋脚の変状防止を目的とした地盤改良を行う必要があった(図-6、範囲A)。また、下水人孔の直下は土留め壁を打設できないため、この土留め欠損部の防護を目的とした地盤改良を併せて行う必要があった(図-6、範囲B)。

ただし、これらの改良範囲は全て既設構造物の直下に位置するため、地上からの施工は困難であ

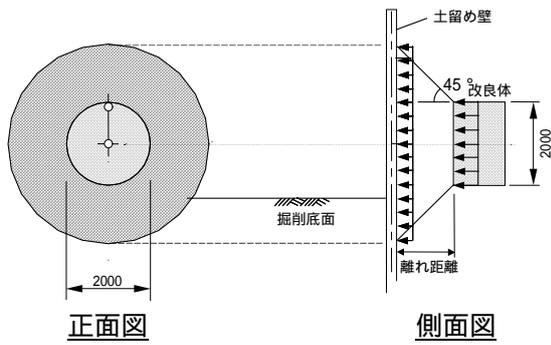


図-7 改良部の内部圧力分布

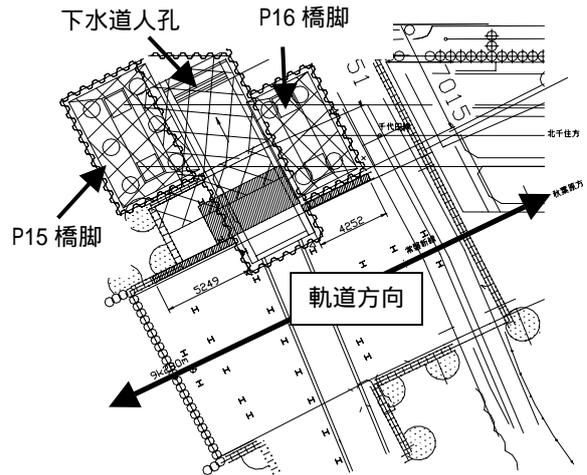


図-9 地盤改良範囲平面図

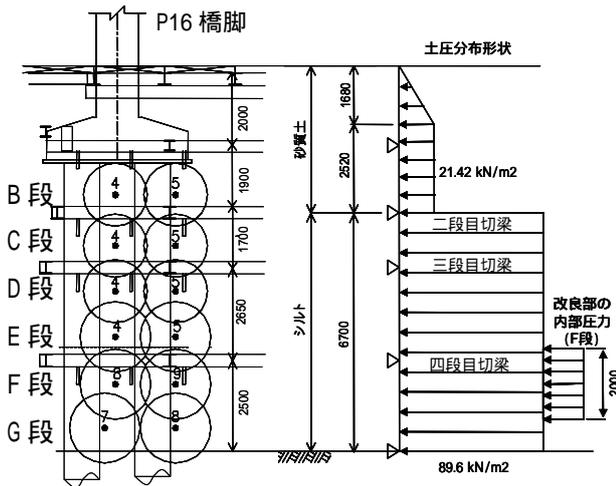


図-8 土留め支保工検討モデル

る．そこで、立坑を利用して構造物の直下を横方向に地盤改良できるラテラルジェット工法が採用され、橋脚防護として 620m<sup>3</sup>、土留め欠損防護として 200m<sup>3</sup>の地盤改良を行うことになった。

## (2) 対象地盤

改良対象となる地盤は、図-6 に示すように、表層部に厚さ 3.0m程の薄い砂層 (N値 = 5~15)、深度約 18mまでは概ねN値ゼロに近いシルトを主体とした沖積層 (有楽町層)、それ以深は砂層 (N値 = 5~50) により構成されている。また、地下水位は深度約 2mであるが、シルト地盤上の砂層を移動する地下水と考えられる。

## (3) 事前検討

現場での試験施工に加えて、造成時における改良部の内部圧力の影響について事前検討を行った。

### a) 施工時の土留め支保工の安定検討

改良部の内部圧力は、硬化材の吐出量とスライムの排出量との収支を一定に制御することにより、改良位置の初期土圧に相当する圧力に保持される。この内部圧力(P)はスラリー状のスライムを介して改良部の周囲に均等に作用するため、横方向へは初期土圧を上回る増分土圧(P)が作用する。

$$P = (1 - K) P \quad (1)$$

ここに、K；土圧係数

図-7 に示すように、この増分土圧が水平方向へ 45°の広がりをもって分布するモデルを仮定すると、改良箇所が土留め壁から概ね 4m以内の範囲に接近すると、土留め支保工 (切梁、腹起こし) の配置に対する安定性の検証が必要となってくる。

今回、土留め支保工への影響範囲内に位置し、条件が最も厳しいと考えられるのは、土留め壁直近までを改良範囲とする P16 橋脚下を施工する場合である。そこで、図-8 に示すように、慣用法にて計算した水平方向の見かけの土圧分布に、内部圧力による土圧の増分を重ね合わせた検討モデルを立てた。内部圧力の荷重条件は、土留め支保工に対して安全側に見積もるように、増分土圧を、式(1)において  $K=0$  とした。これらの応力照査により、土留め支保工の各部材に発生する断面力は、各部材の許容応力度以内に収まることを確認した。

### b) 施工時の既設橋脚の安定検討

ラテラルジェット工法による地盤改良範囲の平面図を図-9 に示す。基礎杭が改良範囲に含まれる橋脚は 2 基 (P15, P16) で、各々昭和 42 年頃に施工されたものである。基礎杭は、P15 橋脚に 6 本、P16 橋脚に 4 本配置されており、全て 1.0mの場所打ち杭である。また、杭長は 24~27mで何れも支持層にまで到達している。しかし、支持層までの地層はN値=0 に等しい軟弱地盤であり、水平方向の地盤反力は期待できない。このため、基礎杭およびフーチング直近における造成時には、改良部の内部圧力により局所的な変状を与えることが懸念された。そこで、以下の状況を想定して基礎杭およびフーチングの安定性について照査することとした。

橋脚フーチング直下および基礎杭直近での造成に伴う基礎杭の応力状態。

橋脚フーチングの浮き上がりと基礎杭の引抜け変形。(変形の管理値は、±3.5mm)

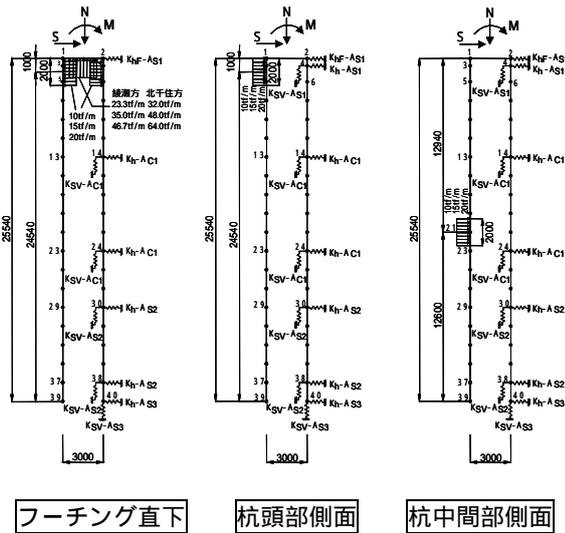


図-10 造成時の橋脚安定解析モデル

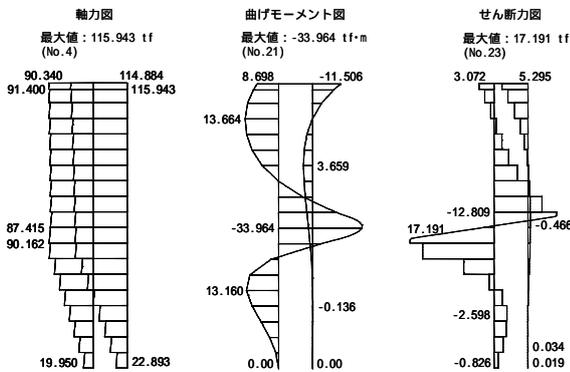


図-11 解析結果の例（杭中間部側面）

検討方法は、地盤反力をバネ支承で表現したフレームモデルによる弾性解析とし、基礎杭の応力については、曲げモーメント、軸力、せん断力の最大値に対する断面照査を行い、橋脚フーチングの浮き上がりと基礎杭の引き抜け変形については、鉛直変位に対する管理値との比較を行った。以下に詳細を示す。

荷重条件：基礎杭の変形の検討では、固定死荷重、列車荷重、衝撃荷重、制動荷重を考慮し、浮き上がりの検討では、固定死荷重のみを考慮した。

載荷位置：図-10 に示すように、橋軸直角方向に基礎杭の直近を改良する場合について、支持杭の応力照査はフーチング直下、杭頭部の側面および杭中間部の側面、浮き上がりとはフーチング直下、にそれぞれ内部圧力を作用させて行った。

内部圧力：不測の事態も想定して、内部圧力を0.1MPa、0.15MPa、0.2MPaの範囲で変化させた。

検討結果の一例を、図-11 に示す。全てのケースにおいて、応力、浮き上がり、引抜け、は許容値内に納まることを確認した。



写真-2 専用機投入状況



写真-3 口元装置設置状況

#### (4) 施工状況

##### a) 専用機設置

専用機は、25t ラフタークレーンを用いて路面覆工の開口部から、立坑内へ吊り降ろすことによって設置した（写真-2）。また、最終的な位置合わせは、専用機に装備されているスライド式の架台と、アウトリガーで行った。また、立坑内での上方向への専用機の移動は、鋼材で組んだ架台を油圧ジャッキで押上げる方式を採用し、移動設置に費やす作業手間を省いた。

##### b) 口元装置の設置

口元装置は、土留め壁にガス孔を空け（鏡切り）、その箇所にてアーク溶接にて設置する（写真-3）。ただし、土留め壁背面に地下水がある場合は、鏡切りの際に地下水が漏出するため、場合によっては背面地盤の陥没や口元装置の溶接不良の原因となる。このため、鏡切り箇所の背面には、事前に裏込め注入による止水を施し、ドライな作業環境としてから鏡切りを行った。

##### c) 削孔・造成

削孔・造成過程については、最も手間を要する



写真-4 ロッド脱着状況

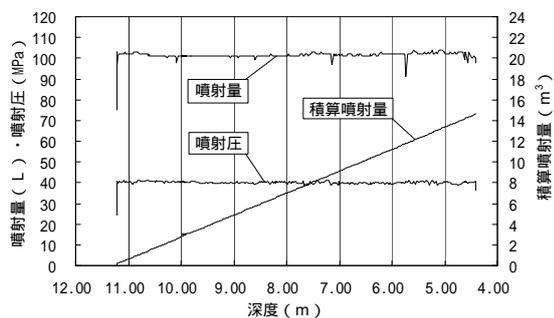


図-12 硬化材と噴射圧の経時変化

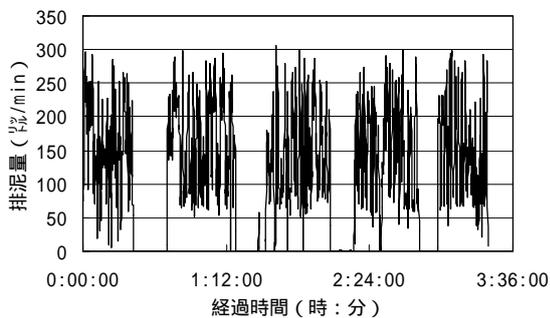


図-13 排泥量の時刻歴図



写真-5 コアサンプリング状況



写真-6 強度確認試験

造成管および排泥管の接続・切離し作業を、専用機に設けた半自動化されたロッド脱着装置により、効率良く進めることができた(写真-4)。また、今回のような支保工、中間杭、つなぎ材が錯綜する狭大な作業環境では、造成時の作業ヤードを考慮した機材配置について事前に詳細な計画を立てたことが、作業の効率化を促した要素の一つである。

## (5) 施工結果

### a) 改良体の仕上がり状況

改良体の仕上がり状況の良否は、造成システムの稼働状態、コアサンプリングによる供試体の外観、強度、および掘削後の橋脚基礎の挙動から、以下のように判断できる。

造成システムの稼働状態

図-12 は、改良位置E 2での造成時における硬化材と噴射圧の経時変化を示したものである。これらのデータから、硬化材は所定の吐出量、噴射圧の下で供給されていたことがわかる。また、図-13 は、排泥量の推移を時刻歴で示したもので、排泥量調整装置により事前に設定した変動範囲内(120～200 l/min)に制御されていたことがわかる。これより、硬化材の吐出量とスライムの排出量の収支は、所定の範囲内で一定のバランスを保持しながら推移しており、造成システムが安定して稼働している状態を示している。

### コアサンプリング

造成した改良体を水平方向にコアサンプリングした供試体を写真-5, 6 に示す。局所的に粉碎できなかったシルト土塊を介在するが、一様な棒状の

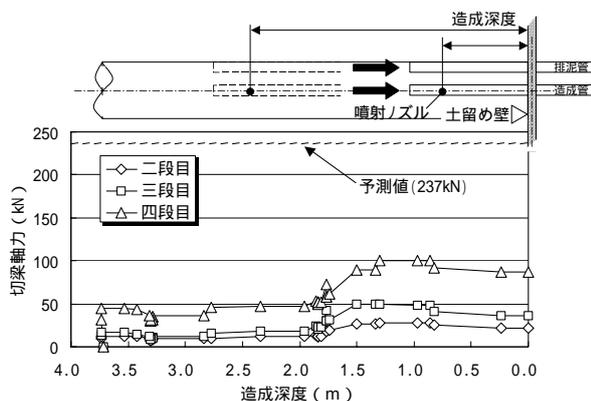


図-14 切梁軸力と造成深度の関係

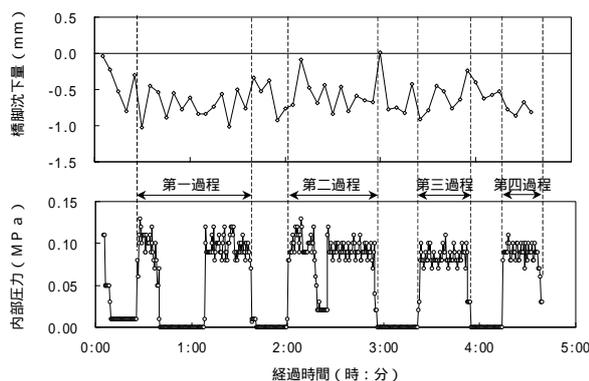


図-15 橋脚変位および内部圧力の時刻歴図

固結体を採取できた。この供試体の平均一軸圧縮強度は、 $7.2\text{MN}/\text{m}^2$ であり、設計強度の  $1.0\text{MN}/\text{m}^2$ を満足する結果であった。

#### 土留め欠損部

土留め欠損部の改良部は、土留め壁としての機能を果たすため、個々の改良体が互いにラップする密な配置としている。造成終了後の掘削において、シルト地盤は掘削高さ（5 m）分の自立壁を形成し、その間における橋脚基礎の変形量も許容値内に収まったことから、個々の改良体は一体となって土留め壁の機能を果たしていることを確認できた。

#### b) 改良位置と切梁軸力との関係

図-14 は、G 7 造成時における切梁の軸力と造成深度との関係を整理したものである。図中の造成深度とは、土留め壁から噴射ノズルまでの距離を示している。これより、切梁軸力は造成位置が土留め壁に接近するに伴い増加する傾向にあり、その実測値は予測値 237kN の 42%に相当する 100kN 程度であった。これは、(1)式において土圧係数  $K=0.0$  として安全側に評価したことに伴う差と思われる。静止土圧係数が 0.5 程度であることを考慮すると、改良部の内部圧力による水平土圧増分に対する検討モデルとしては妥当であると思われる。

また、他の造成位置の予測値と実測値の関係についても同様な結果が得られた。

#### c) 橋脚基礎への影響

図-15 は、D 4 造成時における橋脚の鉛直変位の経時変化を示したものである。鉛直変位は、造成開始から終了までの間一定の振幅をもった変動を沈下側で繰り返しており、その変動幅は、1.0mm 以内であった。この間、改良部の内部圧力は、概ね土被り厚相当の 0.1MPa で一定に制御されており、各造成過程における改良部の内部圧力は一定に保持されていたため、橋脚基礎への影響は許容値の範囲内に納まったと思われる。

## 5. まとめ

開削工事に伴い、近接する鉄道高架橋の変状防止、および地下埋設物直下の土留め欠損部の防護を目的として、ラテラルジェット工法により立坑内から既設構造物直下の地盤改良を行った。その結果として、以下の知見が得られた。

施工に先だって実施した現場試験施工により、地盤材料に適した造成時の施工仕様や硬化材の配合を事前に設定できたことにより、造成システムの施工初期におけるトラブルの発生を抑えられた。

改良部の内部圧力は、硬化材の吐出量とスライムの排出量を一定の割合に維持管理することで、地盤の初期土圧に相当する圧力を保持できることを確認できた。ただし、その割合は地盤材料によって異なると思われる。

改良範囲が土留め壁の直近にまで及ぶ場合は、改良位置が土留め壁に接近するに伴い、切梁に作用する軸力は増加する傾向を示した。その際、土留め支保工部材の安定性は、土留め壁に作用する見かけの土圧に、 $45^\circ$  方向に分布すると仮定した内部圧力を重ね合わせたモデルで評価できる。

既設構造物の直近を造成する場合は、改良部の内部圧力による構造物への影響について事前に検討する必要がある。

造成時における橋脚基礎の変位は、1.0mm 程度以内に納まり、改良部の内部圧力が初期地圧相当に維持されていたと思われる。これは、排泥量調整による内部圧力の制御機構が有効であることを示している。

改良体の仕上がりは、造成システムの稼働状況、コアサンプリングによる一軸圧縮強度、および掘削後の橋脚基礎の挙動などから判断して、当初の目的を満足する良好な状態にあるといえる。

狭隘な立坑内での専用機の上下移動は、架台を油圧ジャッキで押し上げる方式とした。また、造成時の作業ヤードを考慮した機材配置の詳細な計画を事前に立てたことにより、作業を効率的に進めることができた。

最後に、L-JET工法の施工を行うにあたり、多大なご指導とご協力を賜りました関係各位に、謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 高橋則雄，所武彦，永岡高，中根淳：高圧噴射攪拌による水平方向への地盤改良（その1） - 主要要素技術の機能確認試験 - ，第36回地盤工学研究発表会講演集，pp.1131-1132，2001.6
- 2) 飯島正和，永岡高，所武彦，鈴木浩：高圧噴射攪拌による水平方向への地盤改良（その2） - 実地盤での施工確認試験 - ，第36回地盤工学研究発表会講演集，pp.1133-1134，2001.6
- 3) 沼田佳久，永岡高，中根淳，所武彦，高橋則雄，鈴木浩：高圧噴射攪拌による水平方向への地盤改良 実地盤における施工試験 ，土木学会第56回年次学術講演会講演概要集，pp.458-459，2001.10
- 4) 柴崎光弘：高圧噴射注入工法，土と基礎，Vol29, No.5, pp.29-36，1981.5
- 5) 小田恵之輔，鍛冶茂仁，居相好信，中島浩平，中川浩二：水平方向噴射攪拌工法における施工時地盤内圧力の設計と管理に関する検討，土木学会論文集，No.595/ -39, 39-49，1998.6
- 6) 中根淳，沼田佳久，高橋則雄，鈴木浩：高圧噴射攪拌による水平方向への地盤改良（その3） - 現場における試験施工 - ，第37回地盤工学研究発表会講演集，pp.1119-1120，2002.7
- 7) 鈴木浩，永岡高，中根淳，沼田佳久，所武彦，高橋則雄：高圧噴射攪拌による水平方向への地盤改良 - 軟弱地盤での現場試験施工 - ，土木学会第57回年次学術講演会講演概要集，2002.9
- 8) 中根淳，所武彦，高橋則雄，鈴木浩，永岡高，沼田佳久：高圧噴射攪拌による水平方向への地盤改良工法，第5回地盤改良シンポジウム論文集，pp.61-66，2002.11