

## 強制排泥装置を有する水平方向噴射攪拌工法の開発

## Developments of Horizontal Jet-Mixing Method Using Forced Slime Discharger

小田恵之輔	Keinosuke ODA	((株) 奥村組 情報システム部)
鍛冶茂仁	Sigehito KAJI	(鹿島建設 (株) 海外事業本部)
川相 章	Akira KAWAI	(三井建設 (株) 土木技術部)
松田 博	Hiroshi MATSUDA	(山口大学工学部 社会建設工学科)
中川浩二	Koji NAKAGAWA	(山口大学工学部 社会建設工学科)

地盤改良工法の一つである高圧噴射攪拌工法は、主に鉛直方向の施工が行われてきた。水平の場合、施工距離が短く造成径が小さい等の制約がある。この原因は排泥方法にあると思われる。排泥の不良は造成時に地盤内の圧力を上昇させ、周辺地盤や構造物へ影響を与える可能性がある。そこで、強制排泥装置を備え、地盤内圧力の制御が可能な工法の検討を行った。まず、強制排泥装置の特性を実験的に把握し、次に適切な地盤内圧力を数値解析で検討した。この検討に基づき現地で水平の造成実験を実施し、鉛直と同等の造成体が周辺への影響を抑制して作製可能なことを検証した。開発した噴射攪拌工法の現場への適用事例を検討した結果、目的とした造成体はほぼ作製可能であるが、新たな課題も明らかになった。

キーワード：地盤改良，水平，噴射攪拌工法，強制排泥 (IGC : K-6, K-14)

## 1. はじめに

硬化材あるいは水の高圧ジェットを用いて地盤を切削し、切削した土砂と硬化材を混合して地盤を強化する噴射攪拌工法は、地盤改良工法の一つとして1970年代初期に開発され今日まで実用に供されてきた。

噴射攪拌工法は構造物基礎の地盤改良、近接施工に対する既設構造物の防護、あるいは掘削地盤底部の補強等多くの場面で用いられており、主として地表から鉛直方向あるいはそれに近い角度で施工を行ってきた。

近年主として都市土木において、地下構造物や埋設物が錯綜し地表部からの改良が困難である場合が生じ、噴射攪拌工法を水平方向に利用する場合が見られる。しかし、水平方向に施工可能な距離は従来の鉛直方向の施工距離に比較して短く、造成体の直径も小さい。

施工距離が短い理由は、水平方向ではエアリフト作用が利用できないので排泥が困難なためである。排泥が困難になると硬化材の噴射に伴って地盤内の圧力が上昇し、地表への硬化材の噴出や地盤変位の発生、あるいは近接構造物へ損傷を与える可能性が生じる。

つぎに、造成体の直径が小さい理由は、ジェットに添わせて噴射すれば造成径の拡大に効果のある圧縮空気が水平施工では使用が困難なためである。水平施工で空気を使用すれば地盤内に滞留し、造成体に空洞が生じるばかりか、圧縮空気が地盤内に漏洩して噴発等の障害が考えられる。

そこで、筆者らは水平施工において従来の鉛直方向と同等の造成体を周辺環境に与える影響を少なくして作製することを目的として、図-1に示すような強制排泥装置を有する噴射攪拌工法の開発<sup>1), 2)</sup>を行った。本論文では水平方向噴射攪拌工法の開発と現場への適用について述べる。

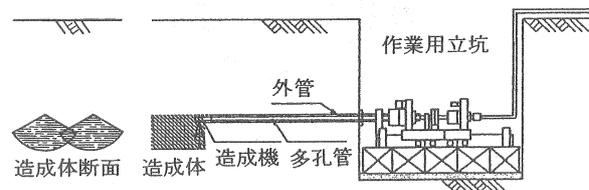


図-1 水平方向噴射攪拌工法の概要と造成体<sup>2)</sup>

## 2. 工法の概要

従来、噴射攪拌工法は鉛直方向の施工が主であり、削孔時あるいは造成時に生じる排泥はロッドと地山の間隙を利用して排出していた。今回開発している工法は、水平方向の施工を可能とするため排泥の効率を向上させる目的でロッド内に排泥専用のパイプを設置し、水ジェットで排泥を強制的に排出する機構を採用している。この水ジェットの圧力を調整して排泥量を制御するのが特徴である。

図-2、写真-1に示すようにロッド内部には上述の排泥パイプに加え、排泥用のジェット水を圧送するパイプ、硬化材の圧送用パイプ等、数種のパイプが設置してあり、このロッドを多孔管と称している。

複数のパイプを内蔵するため多孔管は回転でなく任意の角度から正負半回転まで可能な揺動運動を行いながら硬化材を噴射し、多孔管を順次後退させて造成体を作成する工法である。

注\*本論文は参考文献1), 2)を再構成し、施工実績データを新たに加えてまとめたものである。

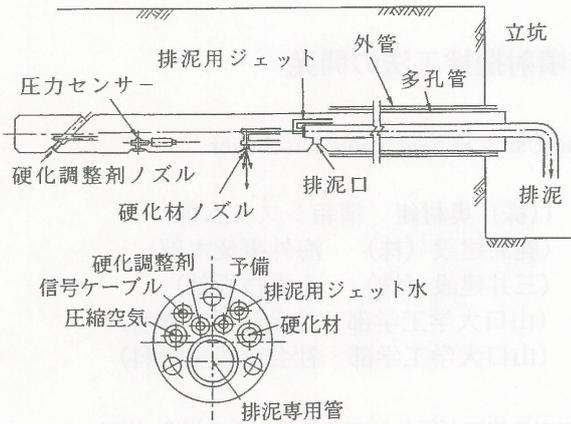


図-2 先端部の造成機と多孔管<sup>2)</sup>

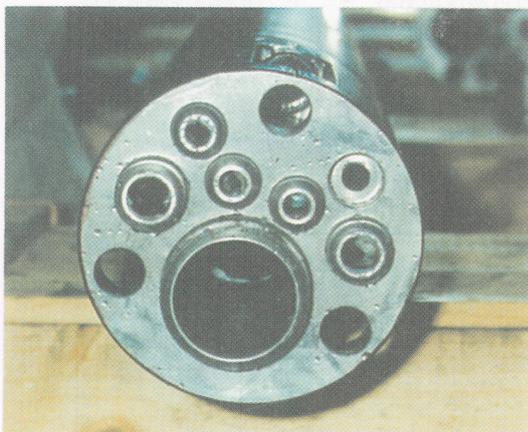


写真-1 多孔管接続面<sup>1)</sup>

### 3. 強制排泥装置とその特性

周辺地盤や構造物に影響を与えずに水平方向に造成体を作製するには地盤内の応力を大きく変化させないことが必要である。そのためには地盤内に噴射した硬化材とほぼ等しい量の余剰の切削土砂等と、噴射した空気的全量を排泥として地盤内から取出す必要がある。

#### 3.1 地盤内から排出すべき排泥量

噴射する硬化材の量は硬化材の密度、粘性、あるいは噴射圧力、ノズル径、圧送時の損失等によって機械設備から定まる量である。本工法で用いる約 96l/min の硬化材量は造成体の形成に不可欠であり減量すれば造成径の減少となることから減量は考えにくい。硬化材のジェットに沿わせて噴射する空気量は従来の鉛直方向では必要量を厳密には検討されておらず、減量できる可能性がある。

従来の鉛直方向の施工で使用される空気量は 1.5 ~ 3.0 m<sup>3</sup>/min (大気圧換算) 程度であるが、ここでは水平施工を行う場合の適切な噴射空気量を設定する実験を行った。

実験は水槽の中に図-3 に示すように硬化材噴射用のジェットノズルを水深約 1m で水平に向けて設置し、造成体の直径を 1.5m 程度と想定してノズルから 75cm 離れた地点

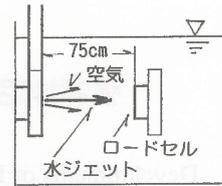


図-3 必要空気量の実験概要<sup>2)</sup>

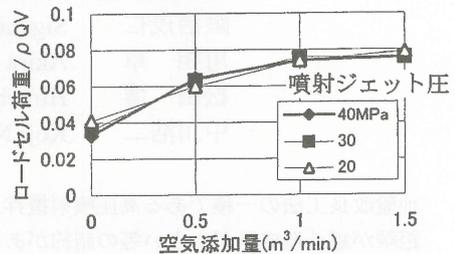


図-4 必要空気量<sup>1)</sup>

に直径 10cm の防水型のロードセルをジェット流に対し直角に置いた。高圧の水ジェットをロードセルの中心に向けて空気を添わせて噴射し、ロードセルの値 (荷重) を測定した。ノズルの直径は一定とし水ジェットの圧力と空気量をパラメータとした。

水流がロードセルに衝突して流れの方向が変化する場合、ロードセルが受ける力 P は流体の密度 ρ、流量 Q および流速 v の積として次式で表すことができる。

$$P = C_1 \cdot \rho \times Q \times v \quad (C_1 \text{ は定数}) \quad (1)$$

そこで、実験で測定した値 (力) を、ジェット水がノズルから噴出した直後で減衰のない状態を仮定した  $\rho Q v$  の値で除して荷重の比を求め、空気量との関係を示したのが図-4 である。同図ではジェットに空気を添わせて噴射する効果が示され、1 m<sup>3</sup>/min 程度で有効な空気量に上限があるように読み取れる。

実験結果から、均一地盤で地盤内の圧力伝播が水中と同じであると仮定して、噴射ジェット圧にかかわらず必要な空気量は 1 m<sup>3</sup>/min (大気圧換算) 程度であると考えた。

以上の検討の結果、本工法では硬化材噴射量とほぼ等量の 100 l/min 程度の余剰の切削土砂等と、ジェットに添加する約 1 m<sup>3</sup>/min の空気を排泥として常時地盤内から取り出す必要があることが分かった。

#### 3.2 強制排泥装置の基本特性

開発した強制排泥装置の能力を確認すること、排泥量を制御することによって地盤内圧力を制御する可能性を確認することを目的として基礎的な実験を行った。

基礎実験で搬送するのは実験条件として組成の複雑な泥水を用いずに、水および空気を対象として、強制排泥装置による搬送量を測定した。

##### 1) 水の搬送量の測定

図-5 に示すように水槽の下部に図-2 に示す造成機を取り付け、排泥用ジェットを噴射して、水槽の水の搬送量を測定した。排泥パイプの直径は約 45mm で延長は約 30 m とした。排泥用ジェットを噴射するノズル径と排泥用ジェットの圧力を実験のパラメータとした。

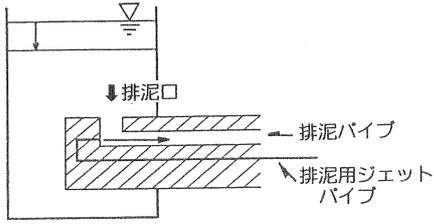


図-5 水の搬送実験概要<sup>1)</sup>

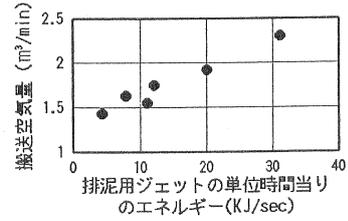


図-8 空気の搬送エネルギー<sup>1)</sup>

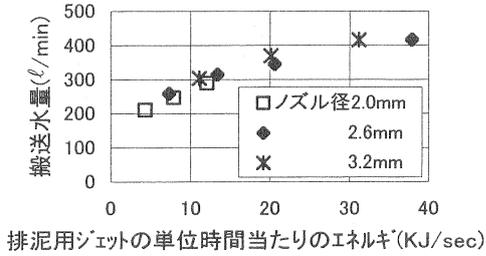


図-6 水の搬送エネルギー<sup>1)</sup>

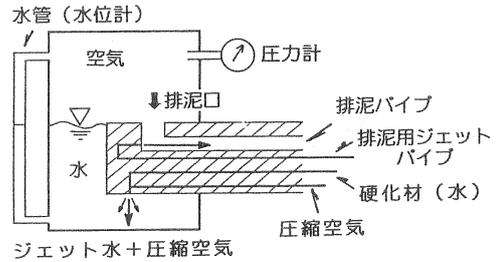


図-9 空気と水の同時搬送実験概要<sup>1)</sup>

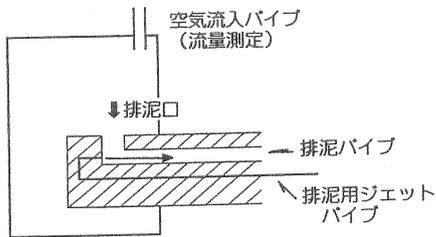


図-7 空気の搬送実験概要<sup>1)</sup>

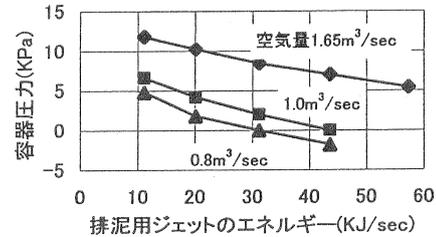


図-10 空気と水の搬送エネルギーと容器内圧力<sup>1)</sup>

水の搬送に用いた排泥用ジェット水の単位時間当たりのエネルギー  $E$  はジェット水の流量  $Q$  と圧力  $P$  の積に比例し次式で表すことができる。

$$E = C_2 \cdot Q \times P \quad (C_2 \text{ は定数}) \quad (2)$$

実験結果を用いてノズル径とジェット圧力から搬送に使用したジェット水のエネルギーを算定し、定数  $C_2=1$  を仮定して実験データを整理すると図-6 に示すように水の搬送量を表すことができる。排泥用のジェットの水量は含めず水槽から搬送した水量のみを示している。

この結果は排泥用ジェットのエネルギーの増加ともない搬送される水量は増加するが、その増分は漸減していることを示している。また、排泥用ジェットの圧力を制御することによって水の排出量の制御が可能であることが示された。

## 2) 空気の搬送量の測定

空気の排出実験は図-7 に示すように密閉した容器の底部に造成機を取り付け、排泥用ジェットを噴射して容器内の空気を排出し容器の上端にある、大気に解放された細いパイプから流入する空気量を流速計で測定した。排泥パイプは約 30m で、排泥用ジェットのノズル径とジェットの圧力を実験のパラメータとした。

空気の搬送に用いた排泥用ジェットの単位時間当たりのエネルギーを表す流量  $Q$  と圧力  $P$  の積で実験値を整理すると図-8 に示すように消費エネルギーにほぼ比例して空気の搬送量が増加することが明らかになった。水の場合と

同様、空気においても、排泥用ジェット圧の制御によって排出空気量の制御が可能であることが示された。

## 3) 空気と水を同時に排出する場合の圧力の測定

実際の状態に少しでも近づけるために排泥の代用として空気と水を同時に排出する実験を行い地盤内圧力を制御する可能性を検討した。

実験は図-9 に示すように密閉した容器に造成機から硬化材の代用に水 (約 96 ℓ/min) とその水に添わせて圧縮空気を同時に噴射し、これを強制排泥装置で外部に排出した場合の容器内の圧力を測定した。

実験を始める前の容器内の水位にかかわらず、1~2分経過すれば容器内の圧力と水位が一定となるので、安定した後の圧力を測定値とした。すなわち、水面が排泥口よりも高い位置にあれば水だけの排出となり、低い位置にあれば空気だけの排出となる。水、空気それぞれ単体では、排泥用ジェットの排出能力は十分あるので、圧力が定常的に安定するのは水位が排泥口付近にあり、噴射した水と空気の全量を排出している場合である。

排泥用ジェットを噴射するノズル径は一定とし、排泥用ジェットの圧力と空気量を実験のパラメータとした。排泥管の延長は約 30m である。

実験結果を排泥用水ジェットの単位時間当たりのエネルギー ( $Q \times P$ ) で整理したのが 図-10 である。いずれの空気量においても排泥用ジェット圧と容器内の圧力はほぼ直

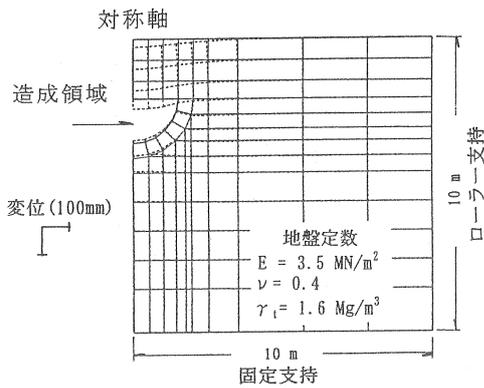


図-11 造成体中心角度 180° の計算結果<sup>2)</sup>

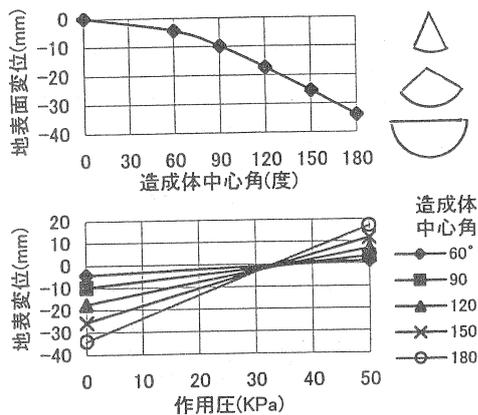


図-12 造成体の断面形状と地表面沈下量<sup>2)</sup>

線的な関係にあることが分かる。

96 l/min の水と 1.0m³/min の空気が単体の場合、排出に必要な排泥用ジェット的时间当りのエネルギーは、それぞれ 5 KJ/sec 以下で十分可能であったが、水と空気を同時に排出する場合、その 10 倍程度のエネルギーが必要であることを示している。

空気と水の混合物の搬送に必要なエネルギーの傾向は把握できたと思われるが、実際の泥水と空気を搬送する場合、さらに大きなエネルギーが必要であり、エネルギー効率は高くないが排泥用ジェット圧の制御によって容器内の圧力が制御可能であることが示された。この結果、地盤内の圧力を制御できる可能性が認められる。

#### 4. 管理目標値として適切な地盤内圧力の検討

造成体の施工による周辺地盤への影響を少なくするために未固結造成体が維持すべき圧力、すなわち施工時の地盤内の設計圧力に関して数値解析による検討を行った。

##### 4.1 計算方法

設計圧力に関する検討は、造成の各種条件にともなう地表面への影響をパラメトリックに検討するために 2次元 FEM 解析を用いて①造成体の断面形状に関する検討、②断面の大きさ、土被り厚さに関する検討を行った。

すべての計算で地盤は均一な弾性体で 2次元平面ひず

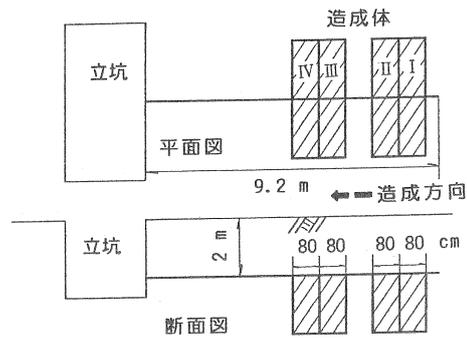


図-13 水平方向造成実験の概要<sup>2)</sup>

み状態を仮定し、弾性係数は後述の実験地盤の N 値 (2~7) から推定して 35 MN/m² を用いポアソン比は 0.4 と仮定し、地盤のみかけの密度は 1.6Mg/m³ としている。さらに未固結造成体の見かけの密度は 1.5Mg/m³ とした。計算では造成体と現地盤の境界は硬化材の漏洩や地下水の浸透がなく圧力のみ伝達すると仮定している。境界条件は造成体の中心軸を対称軸とし外周部とともにすべてローラー支持とし、下端部は固定とした。

##### 4.2 計算条件と結果

###### 1) 造成体の断面形状と設計圧力

従来の工法による造成体の断面形状は円形がほとんどであった。本工法ではロッドを回転ではなく揺動で施工するため、任意の角度で扇形断面の造成体が作成できる (図-1 参照)。この特性を用いることによって、任意の角度の扇形や半円を一部重複させて施工し、目的に応じた一体としての造成体の施工が可能である。

ここでは扇形の中心角度 (60, 90, 120, 150, 180°) をパラメータとして未固結の造成体に加える圧力と地表面変位の関係を検討した。

土被り厚さは 2 m で造成体の半径は 1.5 m として造成する領域の応力を完全に解放し、次に解放した空洞内に密度が 1.5Mg/m³ の液体を充填した。

解析結果の一例を図-11 に示す。この状態では地表面には沈下が生じるが、この沈下量を造成体に作用する圧力が 0 の場合の沈下量とした。(図-12 上段参照)。

その後、弾性計算であることから液状の造成体に単位圧力を加え、圧力が 0 の地盤変位と合成して図-12 下段に示すように任意の圧力における地表面の変位を求めた。

計算結果によると、造成体の天端の鉛直応力に相当する液体圧力を造成体部分に作用させた場合、地表面の変位はほぼ 0 になることがわかる。

###### 2) 造成体断面の大きさおよび土被り厚さと設計圧力

断面の大きさの検討では土被り厚さを 2 m とし、造成体の半径をパラメータ (0.5 m ~ 2.0 m) として地表面変位の検討を行った。断面形状は半円形である。

また、土被り厚さの検討では造成体の半径を 1.5 m とし土被り厚さをパラメータ (0.5 m ~ 2 m) とした。

それぞれの計算結果に対して上述の形状の検討と同様に造成体天端の土被り圧に相当する液圧を作用させると、地表面沈下はほとんど生じない結果になった。

表-1 造成時の噴射の条件<sup>2)</sup>

項目	造成体	I	II	III	IV
造成形状					
引抜時間(min/m)		60	40	20	40
硬化材圧力		40 (Mpa)			
硬化材噴射量		90 (ℓ/min)			
空気添加量		1.0 (m <sup>3</sup> /min)			
排泥ジェット圧力		20 (Mpa)			

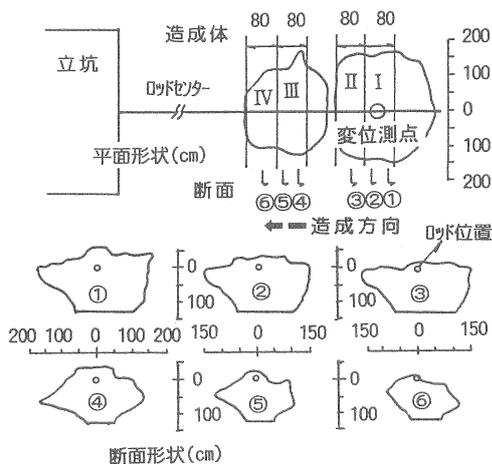


図-14 造成体の出来型形状<sup>1)</sup>

3) 管理目標値として適切な地盤内圧力

以上の解析的な検討の結果、未固結造成体に加える圧力として造成領域頂部の土被り厚に相当する圧力が施工時の管理目標値として適切と考えられる。

5. 水平方向現地造成実験

上述の排泥に関する検討、地盤内圧力に関する検討内容を検証する目的で現地造成実験を実施した。

5.1 実験方法と地盤

実験を行った地盤は地表部から1mまではコンクリート片を含む埋土層である。その下部には貝殻片を多量に含む細砂層で、GL-2.6~-5.5mはシルト層を介したN値が2~7程度の細砂層である。

造成実験は図-13に示すように、土被り厚を2mとし長さ80cmの造成体を4区間作成した。造成体の形状は下向きの半円状を2区間、下向き120°の扇型を2区間としその間を80cm離れた。造成時の噴射の条件は表-1に示すように硬化材の噴射圧力、造成体の形状、多孔管の引抜き時間を変えている。同表に示す引抜き時間は全円を造成する場合の1m当たりの造成に要する時間を示している。

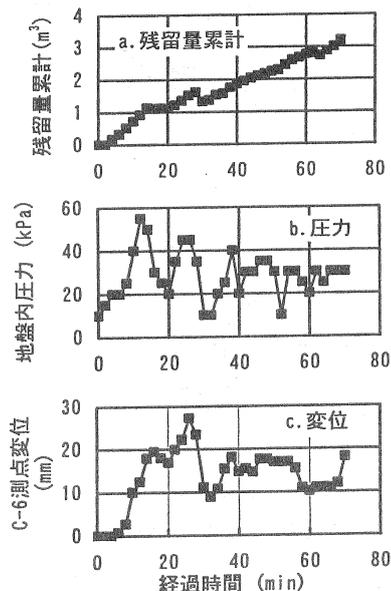


図-15 造成体 I, II 作製時の時系列測定データ<sup>2)</sup>

5.2 測定項目と方法

造成体の出来型は硬化後に掘り起こして計測することとし、周辺地盤への影響は地表面の鉛直変位で代表させ1mの格子状に40カ所で測定した。変位への影響因子として硬化材ジェットの圧力、排泥用ジェットの圧力、排泥量、未固結造成体の圧力を測定した。排泥は水槽に貯留し、水面の上昇量から計測している。

5.3 出来型形状に関する実験結果と考察

掘り起こした造成体の出来型形状を図-14に示す。断面は平面図に示した①~⑥の位置の切断面である。断面図の下端は造成体を完全には掘り起こせないので確認できたところで直線で表示している。

断面形状のばらつきは大きい、半径はおよそ1.2m~1.4m程度と考えられる。従来の鉛直方向の噴射攪拌工法における造成体の設計半径はおよそ1.5m程度であることから、今回の実験において鉛直方向の施工とはほぼ同等の改良体が作成できていると考えられる。

5.4 周辺地盤への影響に関する実験結果と考察

1) 時系列測定データ

ここでは図-14に示した中で造成体 I, IIの実験結果について述べる。造成体作成時に測定した時系列データを図-15に示す。今回の実験において排泥用ジェットの圧力は一定値に維持している。

同図のaには硬化材噴射量から排泥量(排泥量と排泥用ジェット水量の和)を差し引いた値を地盤内への残留量として、その時間的な累計値を示した。

一方、同図のbには前掲の図-2に示す造成機の圧力センサーで測定した未固結造成体の圧力を示した。また図のcには地盤変位の測定値の代表として図-14に示した造成体 I 直上の測点のデータ(隆起が正)を表示した。

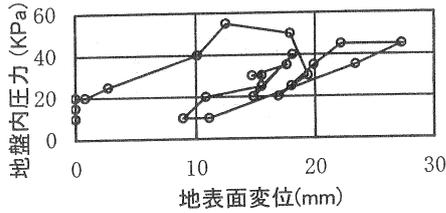


図-16 地盤内圧力と地表面変位<sup>2)</sup>

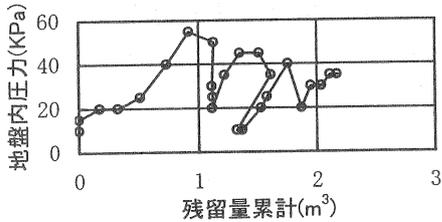


図-17 地盤内圧力と残留量の累計<sup>2)</sup>

図-15において地盤内圧力と地表面変位を対比すると実験開始後40分程度までは圧力の山部と地盤変位の山部の発生時刻がほぼ一致するようである。これらの山部および谷部が生じる時刻は、地盤内残留量累計の勾配が変化する時刻とほぼ一致していることが読みとれる。

また、40分を過ぎてからは変位と圧力の関係が明瞭ではなくなる。この原因は硬化材と空気が地表に漏洩したためである。漏洩の結果、地盤内圧力と地盤変位の関係が崩れるとともに、残留量累計が増加しているにも関わらず、地盤内圧力と地盤変位が増加しなくなったと考えられる。以上のように硬化材と空気の漏洩が生じるまでは地盤内残留量累計と地盤内圧力および地表面変位の測定値は定性的ではあるがそれぞれ相関関係が認められる。

### 2) 地盤内圧力と地表面変位

実験結果を示す時系列データ(図-15)を用いて地盤内圧力と地表面変位の関係を描き図-16に示した。

同図において初期に地盤内圧力が20 kPa程度に上昇するまで地表面変位はほとんど現れず、その後圧力が上昇する過程で圧力と変位はほぼ比例して生じている。さらに圧力が50 kPa程度以上を維持する区間において地盤変位は継続して増加を示す。その後圧力が低下すると地盤は沈下傾向に転じ圧力が10 kPaまで低下した時点で測点は約10mmの残留変位が生じた。

ここで再び圧力が増加する過程は初期とほぼ同じ勾配で地盤は隆起に転じ、概ね地盤内圧力に比例して地表面は再隆起し弾性的な挙動が見られる。

以上のように、設計圧力の付近であれば地盤内圧力と地表面変位はほぼ比例の関係にあるため、周辺地盤への影響を抑制する方法として地盤内圧力を適切な値に維持する方法は有効と考えられる。

### 3) 地盤内圧力と排泥量

図-17に地盤内圧力と地盤内への残留量累計値の関係を示した。同図において残留量が1.0m³程度に増加する初期の過程において地盤内部の圧力と残留量累計値はほぼ比例している。その後、残留量累積値が一定値を維持するか

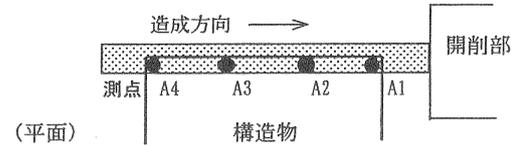
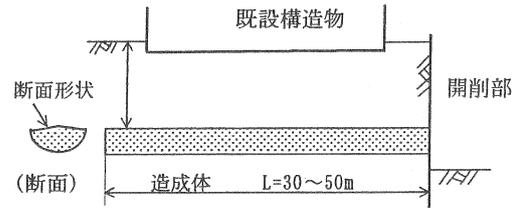


図-18 造成体の施工概要と計測位置

あるいは減少傾向になると圧力の値は急激に低下することが分かる。

つまり圧力が上昇しすぎた場合、排泥量を増加させ残留量の累計値の増加を抑制すると地盤内の圧力を低下させることが可能と考えられる。同図において地盤内への残留量累計が2m³に至る直前で、前述のように硬化材が地表部に漏洩し、それ以後の残留量累計値は地表への漏洩量を含むため、地盤内圧力との関係が崩れたと考えられる。

## 5.5 実験結果のまとめ

図-15に見られるように地盤内の圧力が最初に設計圧力付近に上昇し弾性的な変形が生じるまでの区間において、地盤は弾性的な挙動を示し、地盤内圧力と地盤の鉛直変位は、ほぼ比例の関係にあると思われる。以上のことから、地盤内圧力を調整することが周辺地盤への影響を抑制するために有効であると考えられる。

## 6. 施工データの検討

開発している噴射攪拌工法はトンネルの先受け工法<sup>3)</sup>、地下鉄交差部のアンダーピニング<sup>4)</sup>、地下鉄シールドの補助工法<sup>5)</sup>、さらに推進工事<sup>6)</sup>、シールド工事の周辺構造物の防護工<sup>7)</sup>等への適用が報告されており、現在までに約40現場の施工事例がある。

これらの事例において、主に周辺環境への影響の観点から実施工で得られたデータを検討した。

### 6.1 シールド掘削の防護工

軟弱な地盤にシールドトンネルを構築する場合に地表部にある既設構造物の防護を目的として本工法が採用され、造成時の地盤内の圧力とともに周辺構造物の変位が測定された。

#### 1) 防護工の施工概要

噴射攪拌工法による地盤改良領域は既設構造物に対する防護効果を高めるために、造成体を複数組み合わせ配置で造成されたが、ここでは造成時の構造物への影響が最大と推定される造成体1本のみに着目して造成時の影響

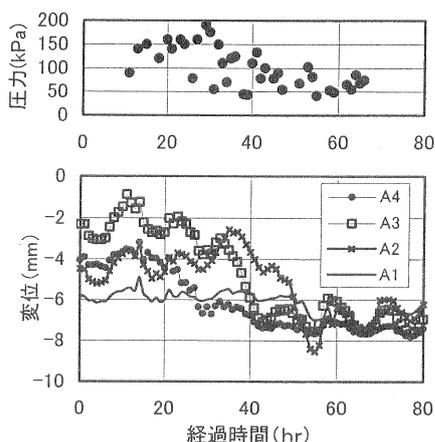


図-19 造成体作成時の鉛直変位と圧力

を検討した。

着目した造成体の土被り厚さは約 10m でN値が2~3程度の沖積粘性土を改良した。造成体の延長は水平方向に約 50m で、造成体の断面形状は半円形に近い扇形で計画し、設計半径は 1,500mm である。施工手順は、開削部から先進ボーリングを行い所定の地点まで達してから、開削部の方向へ噴射攪拌による造成を行った。

### 2) 測定方法および測定結果

近接構造物の敷力所で鉛直方向変位が測定された。ここでは図-18 に示した 4 測点の鉛直変位を用いて検討した。変位は工事期間中 1 時間に 1 回自動記録されている。

造成時の地盤内圧力は本工法の専用造成機 (図-2 参照) に取り付けられた圧力センサーの値が定期的に記録されている。

造成体の施工開始のほぼ 10 時間前を時間軸の原点として測定された変位データとともに変位測定とほぼ同時刻の圧力データを図-19 に示す。

同図において、圧力測定値の表示されている時間が噴射攪拌を実際に行っていた時間に相当するが、各測点の変位記録には施工を行っていない場合でも 24 時間よりも短い周期の変動が含まれている。

同図の短周期の変動はスペクトル解析をした結果、長周期成分を除けば、ほぼ 24 時間および 12 時間の周期変動が卓越していることが分かった。

短周期の影響を取り除き、造成体の施工にともなう影響だけを顕著に表すため、変位記録の移動平均 (時間幅 24 時間) を求め、施工開始時を時間軸の原点とし、さらに噴射攪拌工事以前に生じた各測点の変位を除去するため変位の原点を 0 にそろえて図-20 に示した。

### 3) 造成体の施工による周辺への影響

注目している造成体の施工時に実測された地盤内圧力は図-19 に示したように 40~200kPa の範囲にあるが、多くのデータは 50~150kPa の間に分布している。

一方、今回の施工条件の下では造成体に作用させる適切な圧力として 4 章および 5 章における検討結果から土被り高さを 10m とし軟弱地盤の見かけの密度を 1.6Mg/m<sup>3</sup> と仮定すれば、圧力は 160kPa となる。

変位に関しては、図-20 に示すように移動平均を適用

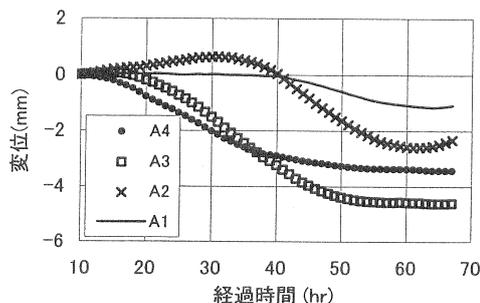


図-20 造成体作成時の移動平均後の変位

した場合、測点 A2 において当初 1 mm 程度の隆起が生じている以外、すべての測点で沈下が生じており、着目している造成体の施工に伴う沈下量の最大値は 5mm 以内であったことがわかる。沈下の原因としては、施工時に軟弱粘土によって排泥口が閉塞したり、周辺部へ空気が漏洩したため設定していた圧力を維持できなかったことが考えられる。つまり最適と推定される 160 kPa 程度よりも造成体の圧力を低下させたことが、すべての測点で最終的に沈下を生じた要因と思われる。

図-19 に示すデータは造成とは関係のない短周期の変動を含んでおり、この影響を取り除かないと造成時の影響が明らかにならないため移動平均を適用した。この結果、地盤変位の短周期的な変動も消去されてしまい、実験で得られた図-16 に示すような変位と圧力の関係を図示することはできなかった。

しかしながら、4 章の FEM 解析、5 章の実験結果を参照すれば実施工で生じた図-20 に見られる変位 (沈下) の発生状況に関して次のように解釈することができる。

造成は前述のように測点 A4 から A1 の方向に施工したが、最も早く造成位置が接近する A4 測点で、まず変位 (沈下) が発生し、最初に収束している。次に A3 に変位が生じ、続いて A2、最後に A1 に変位が生じていることが読みとれる。A4 に明瞭な変位が生じてから A1 の変位が生じるまで、ほぼ 30 時間が経過しており実際の施工とほぼ一致する。

また、A2 測点が隆起したのは 30 分経過後付近であるが、この時間帯の圧力が他の時間帯よりも比較的高い圧力であった。このことが A2 の隆起になった可能性もある。

適切な圧力に関して施工データから直接検証する事はできなかったが、上述の検討結果は実施工で生じた変位を矛盾なく説明することができると思われる。

ただし、空気の漏洩あるいは排泥口の閉塞等によって適切な圧力を維持できない状況は今後解決すべき課題として残された。

## 6.2 地下鉄交差部の施工

図-21 に示すように、既設の地下鉄の下部にはほぼ直行して建設される新地下鉄の掘削部のアンダーピニング工法の 1 つとして利用された。新旧地下鉄の被り厚さがほぼ 3m 程度であり、上部の既設地下鉄構造物を借り受けする桁を架構するための掘削部の補強に利用された。

図-22 に示すデータは既設地下鉄構造物の沈下を示して

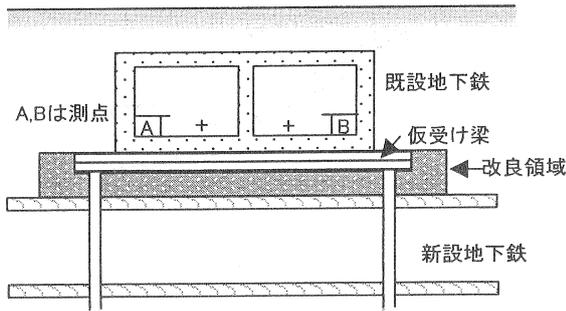


図-21 地下鉄交差点改良の概要と計測位置

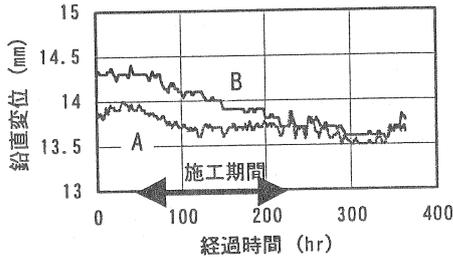


図-22 既設地下鉄の変位測定結果

いる。設置された沈下計の中で噴射攪拌工法の影響が最も大きいと考えられる床板上の A, B 地点のデータである。

同図の 50 時間経過後付近から噴射攪拌が開始され、休止期間を含めて約 1 週間 (210 時間経過) で終了している。噴射攪拌の施工以外にはこの期間に沈下が生じる要素は考えられず、0.5mm~1mm 程度の沈下は噴射攪拌が原因と思われる。

ただし、既設地下鉄構造物は鋼材によって強固に補強されており、地表面の沈下とは異なり、単純に造成の影響が少ないと評価することは困難である。図における変位は周辺地盤の開削による影響で 13mm~14mm 程度の隆起が生じたと報告<sup>4)</sup>されており、その後噴射攪拌の施工で沈下が発生しと推定される。

一般的に噴射攪拌の施工では沈下等の周辺への影響は測定されるが、管理値としての測定であり、地盤内圧力と同期がとれた時系列データが得られることは多くない。ここでも、噴射攪拌にともなう施工時の変位と地盤内圧力のデータを比較検討することは困難であった。

### 6.3 施工実績から明らかになった今後の課題

現在までに 40 例ほどの施工実績があるが、これらの事例において、これまであまり注目していなかった噴射攪拌工法の課題が明らかになってきた。

まず、横浜における地下鉄建設に利用された例<sup>5)</sup>では沈下量は大きい値ではなかったが、最適と思われる地盤内圧力を維持すれば地表面に空気が漏洩し、圧力を低下すれば沈下が生じる現象が現れたと報告されている。6.1 に示した事例と同様の現象が生じており、3 章の図-10 に示したように、地盤内圧力を維持するには空気圧も同じ値を維持する必要がある、空気の漏洩は今後の課題である。

次に、排水路の改修にともなう推進工事の補助工法への適用事例<sup>6)</sup>では噴射攪拌工法に先立つ水平ボーリングにお

いて切削距離の増加にともない先端部が沈下する減少が問題になった。

軟弱地盤における 50m を越える水平ボーリングの孔曲がり現象は造成体の品質を左右する課題である。

## 7. まとめ

従来、鉛直方向に施工されていた噴射攪拌工法による造成体を水平方向に鉛直と同程度の形状で作製し、しかも周辺環境への影響を少なくすることを目的に工法の開発を行ってきた。その結果は以下のようにまとめられる。

- ・強制排泥装置は排泥量を調整し、地盤内の圧力を適切な値に維持するのに有効である。
- ・施工時に未固結造成体が管理値として維持すべき圧力は造成体の天端に作用している圧力である。
- ・造成実験を行った結果、造成体は鉛直方向とほぼ同じ径の造成体が作製できる。
- ・施工実績データの検討では、適切な地盤内圧力を維持すれば周辺環境に与える影響を抑制できることを示唆するデータが得られた。
- ・今回の検討の結果、目的とする水平方向の造成は可能と思われるが、一方、現場施工の積み重ねにおいて、造成時の空気の漏洩、あるいは水平ボーリングの孔曲がりなど、新たな課題も明らかになった。

## 謝辞

本研究は MJS 工法協会が開発し施工した成果、およびジェオフロンテ研究会が支援して実施した研究成果をとりまとめたものである。関係各位に深甚な謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 小田恵之輔, 鍛治茂仁, 中島浩平, 中川浩二: 強制排泥装置を有する水平方向噴射攪拌工法に関する実験的研究, 土木学会論文集, No528, VI-29, pp.155-165, 1995.
- 2) 小田恵之輔, 鍛治茂仁, 居相好信, 中島浩平, 中川浩二: 水平方向噴射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, No595, VI-39, pp.39-49, 1998.
- 3) 原節男, 山口学, 五十嵐瑞穂, 岡田憲明: MJS 工法による坑口長尺先受けの施工, トンネルと地下, 第 26 巻 7 号, pp.533-546, 1995.
- 4) 沼田憲: 地下鉄東西線アンダーパニングの施工, 土と基礎, Vol.47, No.7, pp.21-23, 1999.
- 5) 山崎一政, 館山洪八, 平田憲光, 手塚広明: 国道下の軟弱地盤中障害物を横坑で撤去, トンネルと地下, vol.32, no.8, pp.37-46, 2001.
- 6) 坪井忠弘, 中沢太, 近藤正巳, 小林敬晶, 加嶋透: 幹線道路直下における高圧噴射工法による水平方向地盤改良, 第 34 回地盤工学研究発表会講演集, pp.1705-1706, 1999.
- 7) 伊藤三夫, 高久節夫, 小田信幸, 田邊輝行: 河底下の複雑な近接施工を MJS で克服, トンネルと地下, 第 27 巻 5 号, pp.51-57, 1996.