

強制排泥装置を有する水平方向噴射搅拌工法に関する実験的研究

小田恵之輔¹・鍛治茂仁²・中島浩平³・中川浩二⁴

¹正会員 ジェオフロンテ研究会アンブレラ工法分科会開発Cグループ（奥村組 電算センター）
(〒545 大阪市阿倍野区松崎町2-2-2)

²正会員 ジェオフロンテ研究会アンブレラ工法分科会開発Cグループ（鹿島建設 土木技術本部技術部）
(〒107 東京都港区元赤坂1-2-7)

³全方位高圧噴射(MJS)工法協会 技術部長 (〒112 東京都文京区関口1-47-12)

⁴正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科 (〒755 山口県宇部市常盤台)

従来、噴射搅拌工法は鉛直に近い角度で施工し有效地に利用されてきたが、水平施工の場合は施工距離が短く、造成径が小さいなどの制約がある。この原因は排気を含めた排泥方法にある。排泥の不良は地盤内圧力の上昇を生じ地盤変位の要因となる。さらに、切削の補助に有効な空気を使用しない場合は造成径が大きくならない。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に関する実験的研究を行った。まず切削に効率的な空気量を実験的に検討し、排泥量の制御による地盤内の圧力制御の可能性を検討した。実際の噴射に近い空気と水を同時に排出する圧力容器での実験を行い、実地盤において水平方向の造成実験を行った。地盤内の圧力はほぼ想定した範囲内に納まり空気の排出と地盤内の圧力制御の可能性を確認した。

Key Words: soil improvement, jet mixing method, horizontal direction, forced slime discharger

1. はじめに

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搅拌工法¹⁾は、1970年代初期に開発され今日まで実用に供されてきた。噴射搅拌工法には現在多くの具体的な工法が開発されている。大きく区分すれば、硬化材のみを高圧ジェットとして噴射し地盤を切削して硬化材と搅拌し、円柱状の造成体を作製するCCP工法²⁾(スラリー噴射系)、硬化材のジェットの周辺から空気を噴射し造成径の増加を図るJSG工法³⁾(スラリー・空気噴射系)、水ジェットと、それに添わせて空気を噴射して地盤を切削し、その後別のノズルから硬化材を噴射して地盤と硬化材の置換率の増加を図るコラムジェット工法⁴⁾(スラリー・空気・水噴射系)が代表的である。

1980年代の後半にはコラムジェット工法における硬化材の噴射圧を高めて400 kgf/cm²程度とし、かつ空気を添わせて2次切削を行うRJP工法⁵⁾や、硬化材の噴射量を格段に多くして直径5 mの造成体の作製も可能とされているスーパージェット工法⁶⁾が開発され現在に至っている。

一方、噴射搅拌工法を利用面から見ると、構造物基礎の地盤改良、近接施工に対する構造物の防護工、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、

これらの工法では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いる。

近年主として都市土木において、地下埋設物が錯綜し地表部からの造成が困難である場面が生じ、噴射搅拌工法を水平方向に利用する場合が見られる。なかでも、NATMにおける切羽の先受工法に水平、もしくはやや斜め上向きの噴射搅拌工法として前述のCCP工法や、RJFP工法が利用⁷⁾されている。

これらの水平方向の施工距離は従来の鉛直方向の施工距離に比較して短く、造成径も小さい。

従来の鉛直施工と比べて水平施工では噴射搅拌に伴って生じる切削土砂等の排出に問題があると考えられ、鉛直施工と同等の造成を行うには、空気の排出を含めた効果的な排泥法が必要と思われる。

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作製するために強制排泥装置を有する噴射搅拌工法の開発を目的とした実験的研究を行った。すなわち、地盤の切削の補助に有用な空気の添加量の検討を行うとともに、強制排泥装置の特性を確認する実験を行った。さらに実規模の現場実験を行い水平方向の噴射搅拌工法の排泥法に関する種々の検討を行った。その結果有用と思われる知見を得たので報告する。

2. 水平施工と問題点

水平方向の噴射搅拌工法はトンネル工事の長尺先受けだけでなく構造物防護のための軟弱地盤の改良工事としての利用も見られるが施工例は少なく、かつ施工距離は短い。

水平方向への施工距離を短くしている最大の要因はその排泥方法にある。鉛直方向の造成では、排泥中に圧縮空気を噴射し多数の気泡を混入させて見かけの比重が小さくなることを利用して揚力を得るエアーリフトによる排泥方法が有効となる。このために排泥の距離に関する制約は少ない。ところが水平施工ではエアーリフトが使用できないため噴射管のロッドと地山の間隙を流路として排泥自体の圧力勾配による排泥を行うことになる。その結果、施工距離の増加に伴い摩擦損失の影響が大きくなることと、地山の崩壊などによって流路の確保が困難になることが排泥を妨げる主要因と思われる。

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、ジェットによる地盤切削の効率を低下させるだけでなく、地表への噴出や地盤変位が生じたり近接構造物へ損傷を与える危険が伴う。

水平方向の施工例が多くないもう一つの理由として、その造成径が大きくなりにくいことが挙げられる。水平施工における造成体の直径は50~70cmが標準的で、地盤条件によっては1mと言われている⁶⁾。従来の鉛直方向の造成径が2m以上も可能であるのに比較して、水平方向の造成径が大きくなりにくい原因是、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。

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。すなわち、従来の鉛直方向の噴射搅拌工法において、空気は2つの利用価値がある。一つは地盤の切削に寄与し、一つはエアーリフトとして排泥に寄与して空気自体も排出できた。水平方向にすることによって空気が排出できなくなるので切削にも利用できなくなつたのである。

周辺地盤や構造物に影響を与える前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、噴射した空気の全量を排泥として取出す必要がある。排泥量は地盤の特性や地下水などの状態によって変化するため常に修正し一定の地盤内圧力に制御することが必要である。なお、本報告では排空気を含めて排泥と称することにする。

本研究の目的である水平方向に大きな径で長距離の造成を行うには、効率的な造成のための硬化材と空気の噴射量の検討とともに、安定した排泥を確保するために排

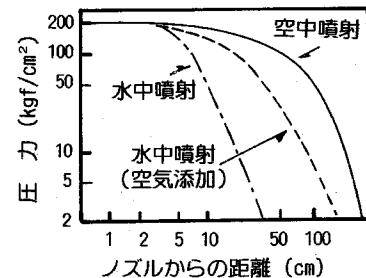


図-1 圧縮空気の効果（柴崎⁸⁾）

泥機構の改善が必要である。

3. 噴射量の検討

(1) 硬化材量

水平で長距離の排泥を効率よく行うためには地盤への硬化材、空気の噴射量を減らし排泥の量を少なくすることが望ましい。しかしながら、地盤に噴射する硬化材は造成体の形成に欠くことができないので減量の対象とは考えにくい。そこで本研究では RJFP 工法で標準的に使用される硬化材量 (80~100 l/min 程度)^{6),7)}を基準とし、連行する空気量と排泥装置の検討を行う。

(2) 空気量

a) 既存の研究による空気連行の効果

柴崎⁸⁾は高圧水ジェットを空中で噴射した場合と、水中で噴射した場合、それと水中で空気を添わせて噴射した実験を行い図-1の結果を得ている。同図はジェット圧力の距離減衰がジェットに空気を添わせると空気を用いない場合よりも少なくなり、空気を添わせることによって地盤の切削力が大きくなることを示唆している。

また、笛尾⁴⁾、吉田⁹⁾らは大口径の噴射搅拌工法の開発の実験の過程で、他は同一条件としジェットに添わせる空気の有無を比較する実験を行い、圧縮空気の効果を示している。それによれば、空気を用いなければ造成体の直径が空気を用いた場合の約 60%になるとしている。

さらに、磯田¹⁰⁾らは噴射搅拌と機械搅拌の複合工法の開発において、空気を添わせると造成径が大きくなることを実験的に示している。

以上のように、地盤の切削に用いるジェットに空気を添わせて噴射する効果は明らかであり、大きな造成径を得るために空気は非常に有効である。

b) 水平施工における効率的な空気量

鉛直方向に造成する従来の噴射搅拌工法では多くの場合、排泥にエアーリフトを利用しているので、空気自体も排泥と共に排出できた。そのため排泥に含まれる空気

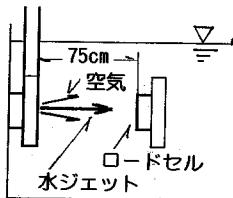


図-2 効果的な空気量を求めるための実験概要

は特に障害とはならず切削に必要な空気の量に関する検討は余りされていなかったと思われる。

従来の鉛直方向の噴射搅拌工法で使用される空気量は1.5~3.0 m³/min程度¹¹⁾であるが、ここでは本工法で水平施工を行う場合の適切な空気使用量を設定する実験を行い、空気量削減の可能性を検討した。

実験は水槽の中に図-2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離した地点に直径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。

ロードセルの表面には薄い鉄板を張りつけ硬化材の代用として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2.8mmで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。

前掲の図-1はジェットノズルからの距離減衰を検討した実験結果であるのに対し、ノズルからの距離を一定にしてジェットの圧力と添加する空気量をパラメータとした本実験の結果を図-3に示す。同図ではジェットに添わせる空気量の増加とともにロードセルの荷重の値は増加するが空気量がほぼ1 m³/min(大気圧換算)のあたりから荷重の上昇傾向が鈍化し、これ以上の空気量の有効性が低下する傾向が見られる。

水流が壁に衝突して流れの方向が変化した場合、壁が受ける反力 P は流体の密度 ρ 、流量 Q および流速 v の積として次式¹²⁾で表すことができる。

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

そこで、実験で測定したロードセルの値(力)はジェットが噴射された壁の反力を相当する力と考えて、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。

同図ではノズルの径やジェットの圧力によらず空気を添わせて噴射する効果が示され、やはり1 m³/min程度で有効な空気量に上限があるように読み取れる。

この実験ではジェット流の拡がりを考慮できていないことなど問題点もあり、この結果が地盤に対する切削力を直接反映するものか判断しがたいが、ある空気量以上

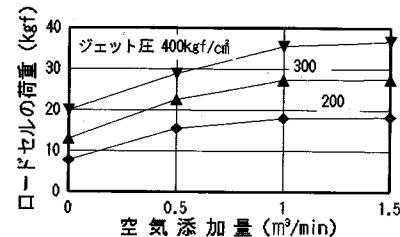


図-3 空気量とロードセルの値

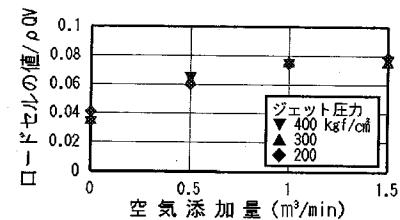


図-4 荷重の比と空気添加量

では空気量添加の効率が低下し、かつその量は本実験結果がそのまま適用できると仮定すれば噴射ジェット圧にかかわらず1 m³/min(大気圧換算)程度であると考えられる。

4. 排泥装置とその特性

水平方向の噴射搅拌工法における排泥を常時安定的に排出するために、本工法では排泥の専用管をロッド内部に設けると共に専用管の内部に排泥用の高圧水ジェットを噴射し強制的に排泥を行う方法を採用した。本報告では前述のように排空気も含めて排泥と称している。

従来の工法では受動的に排泥を行うのに対し、本工法では水ジェットの作用で能動的に排泥を行うのが特徴である。さらに、噴射時の地盤内圧力を制御するために圧力の計測が不可欠であると考え造成機に圧力センサーを設置した。

(1) 強制排泥と造成機構の概要

a) 強制排泥装置

排泥装置は硬化材の噴射を行う造成機の内に、図-5に示すような排泥口を設けて排泥を取り込み、直径約45mmの排泥専用パイプに接続して作業用立坑まで導いている。排泥口の直後に取りつけたノズルから排泥管内に作業用立坑に向けて高圧の水ジェット(400 kgf/cm²まで可能)を噴射しジェット・ポンプとしての作用で排泥を強制的に立坑まで搬送する。排泥用ジェットの水圧を可変とし圧力の制御によって排泥量の制御を試みた。

b) 地盤内圧力測定装置

地盤内圧力を制御するためには地盤内圧力を常時測定することが必要である。本工法では噴射を行う造成機内に図-5に示すような地盤内圧力測定装置を取り付けている。圧力測定装置は造成体とはプラスチックの薄膜で接し、内部にオイルを満たしてその圧力を計測するものである。センサーからの信号は以下に示す多孔管内のケーブルで外部に取り出している。図-5においては地盤内圧力測定装置は上向きになっているが硬化材を噴射するノズルの取付け位置を変更する事によってノズルと排泥口および圧力測定装置をすべて同一方向に変更することが可能な構造になっている。

c) 多孔管

CCP工法やコラムジェット工法などで代表される従来の噴射搅拌工法では噴射を行うノズルまで搬送すべき物質の種類が工法により異なるので使用するロッドの構造も異なっている。CCP工法では硬化材のみを使用するので単管ロッドが用いられる。空気と硬化材を用いるJSG工法では2重管ロッド、コラムジェット工法では切削に水を使用するので3重管ロッドが用いられる。

ところが、本工法では空気と硬化材を送る2種類のパイプに加えて、排泥用のパイプと排泥用の水ジェットを送るパイプの合計4本のパイプと1本の同軸ケーブルが必要である。これらを従来工法と同じく多重管で対応する事は困難なため、本工法では図-6に示すように直径132mmのパイプ内に耐圧パイプと同軸ケーブルを備えたロッドを作製した。これを『多孔管』と称している。

図-6と写真-1に示す多孔管では4つのパイプに加えて、さらに硬化材の固結時間を調節する硬化調整剤を搬送するパイプと、予備の1本の耐圧パイプを備え、合計6本のパイプと1本の同軸ケーブルを備えている。この多孔管の長さは1本が1.5mであり、3本のボルトで相互に接続して必要な長さにして使用する。

d) 揺動

多孔管を用いる場合、回転部と非回転部の接続に従来の工法で用いられているスイベルジョイントを使用するのは効率が悪いため、本工法では回転運動ではなく耐圧ホースで接続した状態でロッドに油圧で揺動運動をさせて造成を行う。

揺動は任意の位置から180°以内の正逆の半回転を行い、結果として360°の全円の造成が可能となる。また全円だけでなく任意の角度で揺動を行うことにより扇形の造成体が作製できる。硬化材の噴射はロッドを5rpm(1分間に5回転する回転速度)で揺動しながら標準的に2.5cmの間隔で段階的に移動させて行う。各段階の引抜時間は造成の条件によって選択できる。

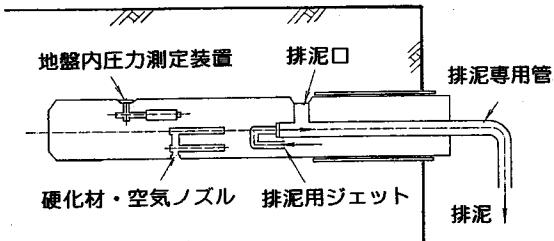


図-5 強制排泥装置の概要

No	用 途
①	排泥専用管
②	硬化材
③	圧縮空気
④	同軸ケーブル
⑤	硬化調整剤
⑥	予備
⑦	排泥用ジェット水

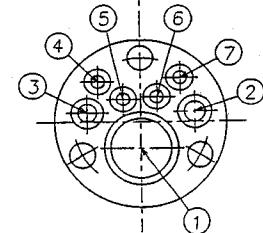


図-6 多孔管の断面

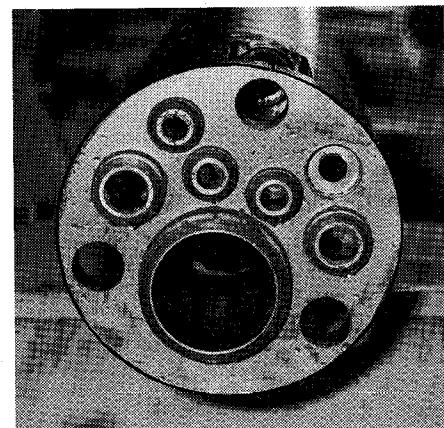


写真-1 多孔管の縦手部

(2) 強制排泥装置の基本特性

前述のように、本研究では従来の噴射搅拌工法を水平方向に長距離施工し、鉛直方向と同程度の造成径を得ることを目的としているため、硬化材の量は噴射圧力が400kgf/cm²程度のRJFP工法で使用される80~100ℓ/minを基準とした。また、ジェットに添加する空気は前章での検討によって適切と判断された1m³/min程度とした。

この結果、本工法で100ℓ/min程度の余剰の切削土砂等と、ジェットに添加する約1m³/minの空気、さらに排泥用ジェット水(約100ℓ/min)を排泥として常に取り出す必要がある。そこで本工法で用いる強制排泥装

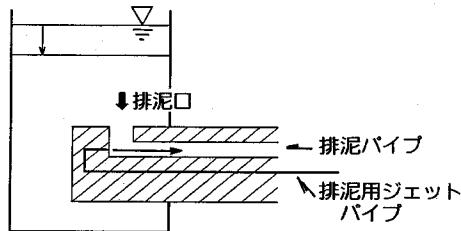


図-7 水の排出実験概要

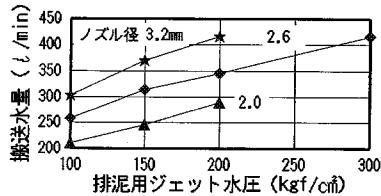


図-8 ジェットの圧力と水の搬送量

置の能力を確認することと、地盤内圧力の制御の手段として排泥量を制御する可能性を確認することを目的として実験的な検討を行った。

実験において、排泥の中に各種の物質が混合した状態では排泥ポンプとしての基本的な排出性能が把握しにくいので、水、空気という単純な条件で強制排泥装置による搬送量を実験的に求めた。

a) 水の搬送量の実験

図-7に示すように水槽の下部に実機と同じ造成機を取り付け、排泥用ジェットを噴射して、水槽の水を搬送する量を測定した。排泥パイプの直径は実機と同じ約45mmで延長は約30mとし、先端部分を水槽の初期水位と同一レベルに保ち自然の流出を防止した。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パラメータとした。

図-8に示す結果には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。

同図によれば、同一のノズル径では排泥用ジェットの圧力増加にほぼ比例して搬送できる水量が増す。またノズル径を大きくすれば搬送量が増加する結果が得られた。

水の搬送に用いた排泥用ジェット水の単位時間当りのエネルギー 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。

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

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単位時間当りのエネルギーを算定し、実験データを整理するとノズル径によらず図-9に

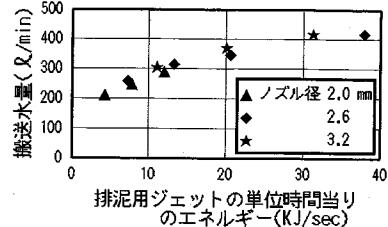


図-9 水の搬送量と排泥用ジェットの単位時間当りのエネルギー

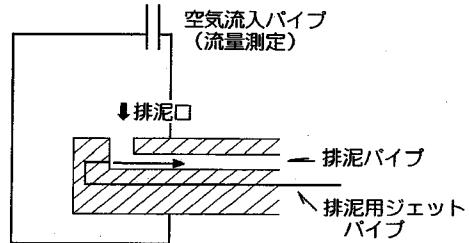


図-10 空気の排出実験概要

示すように水の搬送量を表すことができる。

この結果は搬送に使用した排泥用ジェットの単位時間当りのエネルギーの増加に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、比例関係にはないことを示している。また、水の搬送に関する本実験の場合、排泥用ジェットの圧力を制御することによって400 l/minまでの水の排出量の制御が可能であることが示された。

b) 空気の搬送量の実験

空気の排出実験は図-10に示すように密閉した容器の底部に造成機を取りつけ、排泥用ジェットを噴射して容器内の空気を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。この実験では空気だけの搬送になる排泥パイプは約30mで、排泥用ジェットのノズル径とジェットの圧力をパラメータとした。

実験結果を示す図-11によれば排泥用ジェット圧力にほぼ比例して排出できる空気量が増加し、排泥用ジェットのノズル径が大きくなれば増加する傾向がある。空気量は大気圧に換算した流量で表している。

水の排出実験と同様に空気の搬送に用いた排泥用ジェットの単位時間当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し直すと図-12に示すように実験の範囲内ではジェットの単位時間当りの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、2.3 m³/min程度の空気量までは排泥用ジェット圧の制御に

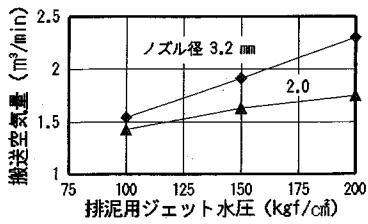


図-11 ジェットの圧力と空気の搬送量

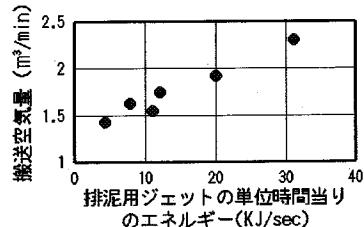


図-12 空気の搬送量と排泥用ジェットの単位時間当たりのエネルギー

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) 空気と水の同時排出による圧力の制御

水、空気を単体で排出する場合、前掲の図-9より搬送水量については $400 \text{ l}/\text{min}$ までの制御が可能であり、図-12より搬送空気量については $2.3 \text{ m}^3/\text{min}$ までの制御が可能であることが実験的に確認できた。

ところが、実際の排泥には切削土砂、水、空気、それに硬化材の一部が含まれており、それらが混合した排泥の排出性能および量の制御の可能性は確認できていない。さらに実際の排泥がどのような混合状態で地盤内に存在しているのか良くわからないため実験室で排泥を再現することは困難である。そこで排泥を実際の状態に少しでも近づけるために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。

噴射した一定量の空気と水を同時に排出する場合の地盤内圧力の制御特性の確認を目的としているため、実際に噴射している地盤近傍の状況に近づけて閉鎖領域である圧力容器を用いて実験を行った。

実験は図-13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 $96 \text{ l}/\text{min}$)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、

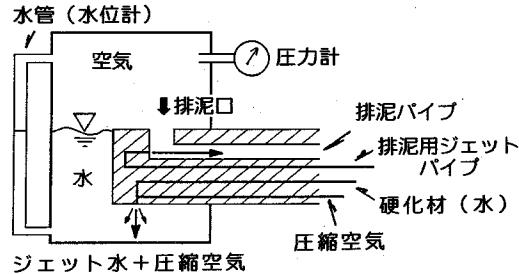


図-13 空気と水の排出による圧力制御の実験

実験に用いた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 3.2 mm で一定とし、排泥用ジェットの圧力と空気量をパラメータとした。排泥管の延長は約 30 m である。容器内の圧力が安定するのは水位が常に排泥口とほぼ同じ高さであることは容器に取付けた水管を用いた水位計で確認している。

実験結果を示す図-14において、従来の鉛直方向の施工でよく用いられる $1.65 \text{ m}^3/\text{min}$ 程度¹¹⁾の空気を添加した場合、排泥用ジェットの圧力を 300 kgf/cm^2 にすれば容器内の圧力が 0.54 kgf/cm^2 で定常となり、噴射した空気と水の全量を排出して安定した状態になったことを示している。

$1.0 \text{ m}^3/\text{min}$ の空気を添加した場合、排泥用ジェット圧が 250 kgf/cm^2 程度で容器内の圧力はほぼ 0 kgf/cm^2 を維持し、空気量を $0.8 \text{ m}^3/\text{min}$ に減じた場合、排泥用ジェットの圧力が 250 kgf/cm^2 では容器の圧力はほぼ -0.2 kgf/cm^2 に低下することが確認できた。

いずれの空気量においても排泥用ジェット圧と容器の圧力はほぼ直線的な関係にあることが分かる。

図-14を排泥用の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-15である。同図を用いれば実験を行っていないノズル径やジェット圧に対しても容器内の圧力をある程度推定することが可能となる。

また $96 \text{ l}/\text{min}$ の水と $1.0 \text{ m}^3/\text{min}$ の空気が単体の場合、排出に必要な排泥用ジェットの時間当たりのエネルギーは、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 倍程度の時間当たりのエネルギーが必要であることを示している。

空気と水の単体よりは実際の排泥に近い空気と水を同時に排出する実験においても実験した範囲内では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。ただし、この実験では排泥の見

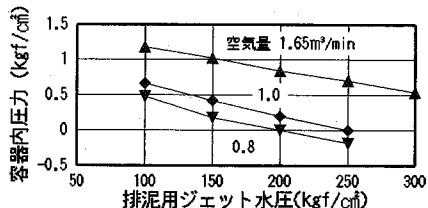


図-14 排泥用ジェット水圧と容器内圧力

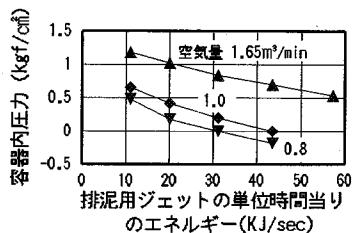


図-15 容器の圧力と排泥用ジェットの単位時間当たりのエネルギー

かけの比重が小さく、固形物が含まれないなど実施工の排泥とはその性状が異なるので、実際の造成時の空気を含めた排泥特性を調査し検討する必要がある。

(4) 排泥装置への空気の収集と造成形状

噴射した空気を排出できる能力のある強制排泥装置を使用しても、地盤内で噴射された空気が排泥装置に収集できないと全量の排出は困難である。すなわち排泥口よりも上部にある空気は何らかの方法を講じなければ排出は不可能である。

従来の水平方向の噴射攪拌工法は空気を添加しないこともあって造成体の形状は円形で問題は生じなかった。

大きな造成径を得るために空気を使用する本工法では排泥口のある多孔管ロッドよりも上部に空気を滞留させないために、造成形状を円形でなく図-16に示すように下向きの半円あるいは扇形にすることとした。半円や扇形に造成することによってジェットに添わせて地盤内に噴射した空気は排泥口付近に集まり排出が容易となる。このような半円あるいは扇形は振動によって造成可能であり本工法に適した形状である。

5. 水平方向現地造成実験

切削した土砂等を含む実際の造成時の排泥を、強制排泥装置によって排出した場合に地盤内圧力の制御の可能性を確認することと、空気量を減じ下向きの半円や扇形に造成して排泥効率を高めた効果を造成体の出来型で確認することを目的として実規模の現場実験を実施した。

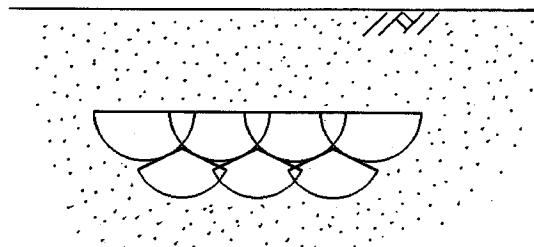


図-16 空気の収集に都合の良い造成形状

(1) 実験地盤

実験地盤は地表部から GL-1 m まではコンクリート片を含む埋土層である。GL-1~2.6 m は貝殻片を大量に含む細砂層で、GL-2.6~5.5 m はシルト層を介在した N 値が 2~7 の細砂である。地下水位は臨海部であるため干溝の影響を受けていると思われるが、およそ GL-1.5 m 付近であった。

(2) 実験方法

実験は図-17 に示すように造成にともなう地表面への影響を顕著にする目的で土被り厚さ約 2 m とし、水平方向に長さ 80 cm の造成体を下向きの半円、あるいは 120°の扇形で 4 区間造成した。

本工法での標準的な施工法は、まず外管と削孔用マシンで必要な長さの削孔を行い、内管を引抜いてから、本工法専用の全油圧式ダブルスイベルタイプのマシンをセットし、多孔管を挿入する。排泥管や硬化材等の各種パイプを接続して造成を始める。

今回の実験では立坑から 9.2 m まで削孔した後、多孔管先端部の造成機の排泥口、地盤内圧力測定装置とも硬化材の噴射ノズルと同じ下向きにして造成を行った。

まず造成体 I を作製し、引き続いて造成体 II を作製した。これに続く 80 cm 区間は造成せずにロッド部分の充填のみを行い、その後造成体 III、IV を連続して作製した。

4 区間の造成（造成体 I ~ IV）は、ノズルの振動角度と引抜時間を変えた。切削の補助に用いる空気量は水槽での実験結果を適用し $1 \text{ m}^3/\text{min}$ （大気圧換算）で一定とした。造成時の条件を表-1 に示す。同表において硬化材の噴射量が $90 \text{ l}/\text{min}$ であるのは、噴射圧力とノズル径を水の場合と同じにしても、水と比べて硬化材の粘性や比重の違いにより吐出量が若干減少するためである。

同表の引抜時間は 1 m を噴射改良する時に造成形状を全円の 360° として換算した場合のロッドの引抜所要時間 (min) を示している。実際の引抜に要する時間は例えば 180° の造成であれば半分の時間で引き抜いている。

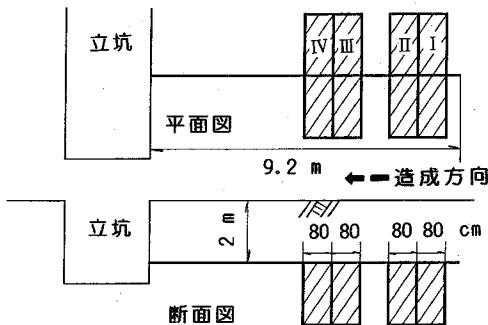


図-17 水平方向造成実験の概要

表-1 造成時の噴射条件

項目	造成体	I	II	III	IV
造 成 形 状		180°		120°	
引抜時間(min/m)	60	40	20	40	
硬 化 材 壓 力	400	(kgf/cm ²)			
硬 化 材 噴 射 量	90	(l/min)			
空 気 添 加 量	1.0	(m ³ /min)			
排泥ジエット圧	200	(kgf/cm ²)			
排泥ジエットノズル径	2.8	(mm)			

(3) 実験結果と考察

a) 地盤内圧力

造成時に周辺地盤への影響を少なくするためには、噴射によって地盤内の応力を大きく変化させないことが必要である。造成前の地盤の初期応力を造成時も維持するのが理想ではあるが、地盤は造成に伴い液状となり、等方的な応力状態になるため造成以前の応力を全ての方向で維持するのは困難である。

このため造成時の地盤内圧力の管理目標値は鉛直方向だけの釣り合いを考えて鉛直方向の初期土圧とした。その値は造成体の土被りを約 2 m とし地盤の湿潤単位体積重量を 1.5 tf/m³ とすれば 0.3 kgf/cm² 程度になる。

造成機に設置した地盤内圧力測定装置から多孔管の同軸ケーブルを経て取り出した地盤内圧力の測定結果を図-18 に示す。

同図によれば、造成体 I を作製する以前に硬化材および排泥用ジェットのテスト噴射をした時に、地盤内圧力が 0.6 kgf/cm² にまで上昇したことがわかる。造成体 I の噴射を始めた直後に圧力が急激に低下しているのは、排泥口付近に詰まった土砂がとれて、急激に排泥量が回復した状態を表している。

今回の造成体 I, II の作製時の圧力を平均的に見れば

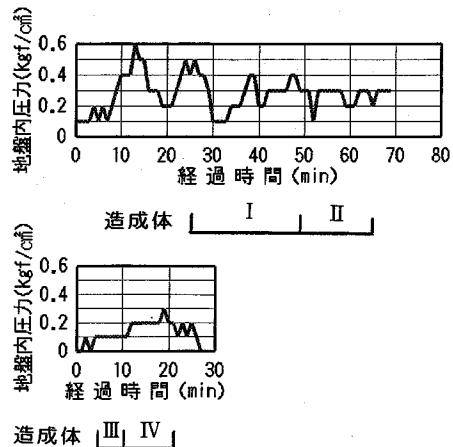


図-18 造成時の地盤内圧力の測定値

造成を始める前に高い圧力が生じた区間を除き、0.2~0.4 kgf/cm² の範囲を維持しほぼ目標値に近い値である。また造成体の III, IV を作製している時の圧力値は 0.1~0.3 kgf/cm² 程度であり目標値よりも少し低い値であった。

地盤内圧力測定装置は前述のように硬化材のノズルと同じ下向きに取付けているため、わずかな空隙があれば地盤の圧力を測定しない。しかし、一端硬化材と圧縮空気の噴射が始まると空隙は充填され設置している場所の地盤内圧力を測定していると考えられる。

実験を行った地盤は貝殻混じりの砂地盤であったが、排泥口付近が土砂によって閉塞する場面も見られた。地盤によっては閉塞に対して何らかの対策が必要であると思われる。

今回の実験では、排泥用ジェットの圧力を実験の開始から終了まで 200 kgf/cm² で一定とした。

前掲の図-15 に結果を示した水と空気だけを排出する実験では長さ約 30 m の造成を前提として同じ長さの排泥管を接続し、排泥用ジェットの圧力を 200 kgf/cm²、空気量 1.0 m³/min の条件では（排泥用ジェットのエネルギー約 24 KJ/sec）容器内の圧力は 0.4 kgf/cm² 程度になった。

現場実験では造成の距離は約 9 m であるが排泥には切削土砂や硬化材の一部と水や空気が含まれており、実験時の平均的な圧力は一部の高圧な部分を除きほぼ 0.2~0.4 kgf/cm² であった。結果としてはほぼ同程度の値である。

容器を用いた空気と水だけの 30 m の排泥実験に比較し、現場実験においては排泥に切削土砂等を含むことによって排泥装置への負荷が増加する一方、排泥距離が短くなったことによる負荷の減少が相殺された結果、容器

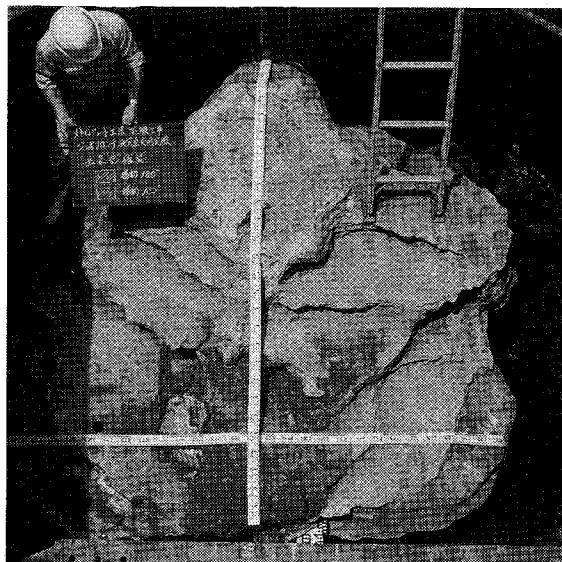


写真-2 挖り起した造成体

の実験と現場実験の結果がほぼ同程度の圧力になったと考えられる。

ここで、切削土砂等を含む排泥に対しても図-15の結果が当てはまり、排泥用ジェット圧の増加とともに地盤内の圧力が低下するものと仮定すれば、排泥用ジェットの圧力を上げることによって、現場実験で行った9m以上の造成距離を確保する事が可能と推定される。どの程度施工距離が延長可能であるかは、排泥の特性や保持すべき圧力によって異なるため、現地での試験施工等によって確認する必要がある。

b) 造成体の出来型形状

写真-2に掘り起した造成体の全景を、図-19に出し型形状の平面および断面を示す。断面は平面図に示した①～⑥の位置の切断面である。断面図の下端部は造成

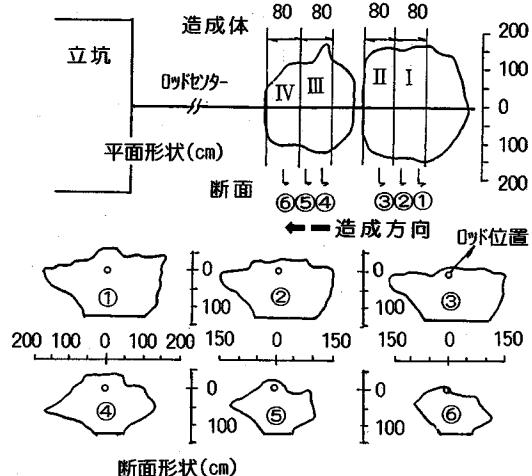


図-19 造成体の出来型形状測定結果

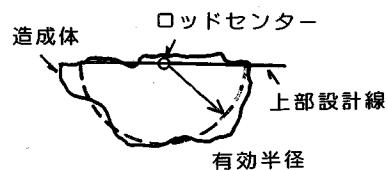


図-20 有効半径の定義

表-2 定義に基づいた造成体の有効半径

断面	造成体	有効半径 (cm)	引抜時間 (min/m)
①	I	138	60
②	I	138	60
③	II	136	40
④	III	121	20
⑤	III	117	20
⑥	IV	122	40

体を完全には掘り起せないので、確認できたところで直線に表示している。

造成体の出来型形状は図-19に示すように各断面によって異なっている。ばらつきのある形状に対して図-20に示すように造成体の上部設計線よりも下部の実測面積から仮想半径を算定し、これを有効半径と定義することにした。

この定義を用いて出来型形状の有効半径を求めた結果を表-2に示す。

同表に示すように造成体の有効半径は1.17～1.38mで引抜き時間を長くすれば造成体の有効半径が増加するが一定時間以上ではその傾向が鈍化するようである。

硬化材の噴射に圧縮空気を添加した効果を今回の実験

結果で直接比較するデータはないが、空気を使用しない従来の水平方向の噴射搅拌工法における造成体の直径が高々 1 m で半径では 0.5 m 程度⁶⁾であることから、地盤は異なるものの実験的検討によって求めた 1 m³/min の空気を添加したことによる造成径の拡大効果が認められる。

また、造成体に空気が残留したことを示す空洞は見られなかった。実験した地盤が透気性のよい砂地盤であり地表部に漏洩した可能性もあるが、室内実験で見られたのと同じように、排泥管から空気と他の排泥が交互に排出されるのが確認できた。造成時に外管と多孔管の隙間からわずかな量の水を主とした排泥が見られたが大部分は排泥専用管から排出していた。

(4) 実験結果のまとめ

- ・排泥に含まれる空気量は測定できなかった。しかし排泥の中に空気が含まれていることは、排泥の状態から確認できた。
- ・造成体には空気の残留を示す空洞は認められなかつた。この結果から噴射した空気の全量を排泥装置から排出できたとは判断できないが、排出できる可能性を示すことができた。
- ・強制排泥装置を用いることにより造成時の地盤内圧力は変動しながらもほぼ目標とする圧力 (0.3 kgf/cm²) を維持することができた。
- ・排泥口に切削土砂等が詰まりやすい地盤では閉塞防止のための何らかの対策が必要である。
- ・切削に使用する空気量を従来の鉛直方向への造成時に使用していた量よりも減量し、造成形状を下向きの扇形または半円形にして空気の収集を図った効果を直接検証することはできなかったが、従来の JSG 工法やコラムジェット工法における造成径 (2 m 程度)¹³⁾ に匹敵する径を確保することができた。

6. 結 論

従来、鉛直方向に実施されたことが多かった噴射搅拌工法を水平方向に施工し、周辺地盤に影響を与えるに鉛直方向と同程度の造成径で長距離の施工を行うことを目的として強制排泥装置を取り付いた噴射搅拌工法の実験的な検討を行った。

本報告では地盤の切削補助に用いる空気の効果を確認し、水平施工の場合に効率的な空気添加量を求める検討を行った。また強制排泥装置の特性と地盤内の圧力制御の可能性を調べる実験を行うとともに実規模の実験で地盤内圧力を測定し、造成体の出来形形状を掘り起こして確認した。

以上の検討から下記の事項が明らかになった。

- ①高压ジェットを用いて地盤を切削する場合、空気をジェットに添加すれば切削距離の増加に有効である。
- ②切削に効率的な空気量は、水平施工で効率よく用いられるという立場からジェットの圧力に関係なく 1 m³/min (大気圧換算) 程度と推定される。
- ③強制排泥装置を用いた搬送実験によれば、空気や水の単体を搬送する場合に必要な排泥用ジェットの時間当たりエネルギーに比較し、空気と水を同時に搬送するのに大きな時間当たりエネルギーが必要である。
- ④水と空気を同時に搬送する場合、排泥用のジェット圧力を増加すれば容器の圧力は単調に減少するのでジェットの圧力を制御することによって排泥量を制御し、排泥量の制御によって、実際の造成時の地盤内圧力を制御できる可能性が示された。
- ⑤実規模の現場実験において硬化材と空気の噴射を行い強制排泥装置で切削土砂等と空気を排出した結果地盤内の圧力は目標とした地盤の初期圧力 (0.3 kgf/cm²) をほぼ維持することができた。
- ⑥実験後掘り起こした造成体には空気の残留を示す空洞は見られなかつた。また造成体は従来の鉛直方向の造成体とほぼ同等の半径 (1.17~1.38 m) であった。
- ⑦この結果、水平方向に噴射搅拌工法で造成体を作製する場合、施工距離は少なくとも実験を行った 9 m 以上において周辺地盤へ影響をほとんど与えずに従来の鉛直方向と同等の造成径で作製できる可能性が認められた。

謝辞：本研究は全方位高压噴射工法協会 (MJS 協会) が工法の開発を実施し、ジオフロンテ研究会が後援して実施した MJS 工法実証実験¹⁴⁾の一部をとりまとめたものである。本論文をまとめる機会を与えていただいたジオフロンテ研究会の長友成樹会長および中釣俊洋事務局長、また終始暖かくご指導いただいた MJS 協会の中西涉名誉会長、中嶋志朗理事長、さらに熱心な討議と貴重な意見をいただいたジオフロンテ研究会アンブレラ工法分科会開発グループ C のメンバー諸氏に深遠な謝意を表します。

参考文献

- 1) 寺師昌明：土質工学 40 年の歩み—地盤改良一、土と基礎、Vol.29, No.5, pp.74-77, 1989.12.
- 2) 土木学会：土木工学ハンドブック、第四版、p.2313、技報堂出版、1989.11.
- 3) RJP 工法技術資料、RJP 工法研究会、1990.
- 4) 笹尾他：超高压ジェットを利用した大口径地盤改良 (スーパージェット工法) の開発に関する研究、鹿島技術研究所年報、第 40 号、pp.227-234、1992.10.
- 5) 師岡紀男他：坑口部の軟弱二次堆積ロームを克服、トン

- ネルと地下, 第 22 卷 12 号, pp.7-14, 1991.12.
- 6) RJFP 工法に関する検討報告書, ジェオフロンテ研究会, 1992.11.
 - 7) 久楽勝行他: 地盤改良工法の要点—地盤改良工法の最近の動向, 土木技術, Vol. 46, No. 12, pp.34-41, 1991.12.
 - 8) 柴崎光弘: 高圧噴射注入工法, 土と基礎, Vol. 29, No. 5, pp.29-36, 1981.5.
 - 9) 吉田宏他: 大口径地盤改良工法の開発(その 3), 第 27 回土質工学研究発表会, No. 820, pp.2169-2170, 土質工学会, 1992.6.
 - 10) 磯田知広他: 超高圧交差噴流を用いた複合攪拌工法の開発, 土木技術, Vol. 49, No.8 号, pp.88-94, 1993.8.
 - 11) 五十鈴信宏他: スーパージェット工法の試験施工, 基礎工, Vol. 19, No. 6, pp.86-88, 1991.6.
 - 12) 中山泰吉: 新版 流体の力学, 養賢堂, pp.67-68, 1989.
 - 13) 土木学会 土木施工研究委員会: 第 3 回新しい材料・工法・機械講習会講演概要 深層地盤改良工法, pp. 124-125, 1988.11.
 - 14) MJS 工法実証実験解析報告書, ジェオフロンテ研究会アンブレラ工法分科会開発グループ C, 1994.12.
- (1995.5.10 受付)

EXPERIMENTAL STUDY ON HORIZONTAL JET-MIXING METHOD USING FORCED SLIME DISCHAGER

Keinosuke ODA, Shigehito KAJI, Kouhei NAKAJIMA
and Koji NAKAGAWA

In case the horizontal application of a jet-mixing method, we can not obtain a long distance and a large diameter of soil improvement. The reason is that slime discharge including air-exhaust does not work which brings increase of slime pressure in the ground and small diameter improvement. To solve the problems, the authors have conducted the experimental study on the new method by applying a forced slime discharger. First, the air amount necessary for effective cut was searched, then the possibility of pressure control was studied. The result of experiments both in the pressurized tank and in field implicates that the control of air-exhaust and slime pressure is practically possible as expected.