支障物撤去型掘進工法における地盤改良用 二液混合噴流の地盤掘削特性に関する研究

神山 守¹・小泉 淳²・磯部 隆寿³・田中 雅彦⁴・志村 洋平⁵

¹正会員 東京都下水道局 流域下水道本部 (〒190-0022 東京都立川市錦町 1-7-26)

E-mail: Mamoru_Kamiyama@member.metro.tokyo.jp

²正会員 早稲田大学教授 理工学術院 (〒169-8555 東京都新宿区大久保三丁目 4 番 1 号)

E-mail: koizumi@waseda.jp

³非会員 鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1)

E-mail: isobeta@kajima.com

⁴非会員 東京都下水道サービス株式会社 技術部 (〒100-0004 東京都千代田区大手町二丁目 1 番 1 号)

E-mail: masahiko-tanaka@tgs-sw.co.jp

⁵非会員 N.JET エンジニアリング株式会社 企画営業部 (〒103-0021 東京都中央区日本橋石町 3-2-7)

E-mail: shimura@n-jet.co.jp

本工法は、シールド工法等の掘進機に二液混合噴流を用いた超高压噴射システムを搭載し、地中支障物の切断・除去や地盤改良などを行う工法として多くの施工実績がある。一方、噴流による周辺地盤への影響は、実験的研究で確認しているものの、近接構造物への影響を明示するには至っていない。

本論文は、二液混合噴流の地盤掘削特性を、噴流の動圧の測定、模擬地盤の掘削過程の観測および FVM 解析により明らかにし、その影響範囲について数値的な根拠を示したものである。本研究の結果、噴流の動圧はノズルからの噴出直後で近接構造物を損傷する恐れがないこと、FVM 解析によって地盤の掘削過程および掘削領域内の流動特性をよい精度でシミュレートできることなどが分かった。

Key Words: pipe-jacking method, shield method, waterjet, fluid, excavation, soil stabilization

1. はじめに

本工法は、推進工法またはシールド工法の掘進機に、二液混合噴流（超高压ジェットと低压ジェットを混合して噴射する方式）を用いた超高压噴射システムを搭載し、地中に残置された鋼矢板やコンクリートパイルなどの支障物を切断・除去し、また、地盤改良などを行う工法として多くの施工実績があり、その適用は拡大してきている。本工法の施工方法や切断性能、地盤改良の精度および改良範囲、周辺地盤への影響などは、これまでに多くの実験によって検証されており、それらは設計・施工報告^{1)~6)}および研究報告⁷⁾⁸⁾としてまとめられている。

一方、二液混合噴流の動圧分布やその減衰などの地盤中の挙動は、施工中に計測することが困難なことから、近接構造物などに与えるジェット噴流の影響や範囲を明らかにするには至っていない。

本論文は、压力容器を用いた水中噴射実験により二液混合噴流の動圧分布を測定し、飽和地盤中における地盤

改良時の影響範囲について考察したものである。

地盤掘削実験は、压力容器中に模擬地盤を作成し、その掘削過程を観測するものであり、これにより二液混合噴流の動圧と地盤掘削の進行状況を把握した。

また、水中噴流に関する FVM 解析を実施し、実験結果と比較検討することでその影響や範囲を検証した。

2. 工法の概要

(1) 開発の背景

推進工法またはシールド工法では、立坑からの発進時や立坑への到達時、急曲線の施工時、また、とくに重要な構造物付近を通過するとき、あるいは支障物に遭遇したときなどに、必要に応じて地盤改良を実施している。これらの場合には、地盤改良は止水性に加えてその強度も要求されることから、セメント系の材料を用いた地盤改良か、または、凍結工法が用いられる。既存のセメン

ト系の地盤改良工法の多くは、鉛直下向きの施工を前提としており、地上からの施工に限定されるため、その適用が困難な場合も少なくない。また、凍結工法は、シールド機内からの施工が可能であるが工期や費用の観点からみると負担が大きい。水平地盤改良が可能なジェットグラウト工法も開発されているが、改良範囲の拡大のためにはエアージェットによるアシストが必要となる。とくに、シールド掘進機の上半の地盤を改良する場合はエアードマリーによる空洞の発生が懸念される。

以上のことから、シールド掘進機に装備が可能で、水平のみならず上方への地盤改良を可能とする二液混合噴流を用いた超高压噴射システムを開発した。

二液混合噴流は、ノズルから噴射する直前に二種類の液体を混合するもので、それぞれの液体の種類および圧力、流量を噴射の目的に応じて適切に設定することにより、その効果を最大化することが可能である。

(2) 本システムの構成と特徴

図-1 は、超高压噴射システムに用いる二液混合ノズルの構造などを示したものである。二液混合ノズルは、ジェットライン（以下 WJ ラインと呼ぶ）から超高压の珪酸ナトリウム溶液が、アプレシブライン（以下 AJ ラインと呼ぶ）から低圧の液体がそれぞれ供給され、ミキシング室内で混合した液体をアプレシブノズル（以下 AJ ノズルと呼ぶ）から二液混合噴流として噴射するものである。

二液混合ノズルは、図-2 に示すように、地盤改良用ノズルと切断用ノズルから構成されており、掘進機の前面に装着される。二液混合ノズルの AJ ラインに供給される液体は、地盤改良を行う場合にはセメントミルクであり、地中支障物の切断を行う場合には研磨材と硬化剤を混合した AJ スラリーである。いずれの場合も混合した流体は珪酸ナトリウムと反応し早期にゲル化し、掘削空間は非流動性の物質で充填されることから、地盤の変状が抑止される。

ノズルの移動は、掘削機のカッターヘッドの微速回転によるほか、必要に応じてカッターヘッドの半径方向に移動可能な移動システムを用いて行う。

3. ノズル内の混合過程のモデル化とその検証

(1) 運動量保存則による混合噴流の噴出速度

本工法による地盤改良では、AJ ラインから 1MPa 程度の圧力でセメントミルクを圧送する。

この液体は WJ ラインからの高速噴流とミキシング室内および AJ ノズル内で混合される。二液混合ノズルの WJ ノズルの出口から AJ ノズルの出口までの距離は、約

図-1 二液混合ノズルの構造と混合過程

図-2 掘進機への超高压噴射ノズル装着概要図

100mm であり、文献 8) に示したウォータージェット (WJ) の水中噴射実験の結果から、噴流軸中心部の高速噴流が周囲の水に運動量を与え、一体化した流れとなるには十分の長さで判断される。

このことから、WJ ラインの運動量と AJ ラインの運動量は加算され、一体化した噴流となり AJ ノズルから噴出すると想定できる。

二液混合ノズルからの混合噴流の噴出速度は、前述したように噴流が一体化されると仮定すれば、以下の手順で算定することができる。

一般に気中に噴射された自由噴流においては大気圧及びノズル内壁摩擦損失を無視すると、噴射圧力 P [Pa]、噴流平均速度 v [m/s] と質量流量 Q [kg/s] および噴流の運動量流束 M [kg・m/s²] の間には以下の関係がある。

$$P = \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \quad (1)$$

$$M = Q \cdot v = Q \cdot \sqrt{\frac{2P}{\rho}} \quad (2)$$

ここで、 ρ は流体の密度 [kg/m³] である。

AJ ラインでは流量計で測定した体積流量 Q_1 [m³/s] と AJ ノズルの有効断面積 A_1 [m²] から式(3)で流速を算出し、

単位時間あたりの運動量流束を求める。

$$v_1 = \frac{Q_1'}{A_1}, \quad M_1 = v_1 \cdot Q_1' \cdot \rho_1 = v_1 \cdot Q_1 \quad (3)$$

AJ ラインからミキシング室に流入した流れは複雑で三次元流れとして取扱う必要があるが、最終的には AJ ノズルのテーパ部で加速され、直線部では v_1 という速度を持つ一次元流れとなる。式(3)は AJ ノズル直線部の一次元流れを記述しており、速度も運動量もスカラーで表記した。

WJ ラインの測定は、超高压で使用可能な流量計の調達が困難なことから式(4)に示すように、噴射圧力 P_2 と WJ ノズルの断面積 A_2 [m²] から体積流量 Q_2' [m³/s] を求め、式(5)で運動量流束 M_2 を求める。

$$Q_2' = A_2 \cdot v_2 = A_2 \sqrt{\frac{2P_2}{\rho_2}} \quad (4)$$

$$M_2 = v_2 \cdot Q_2' \cdot \rho_2 = v_2 \cdot Q_2 \quad (5)$$

WJ ノズルから噴出する流れはミキシング室に流入した時点から AJ ラインからの流れと相互作用し運動量の伝達が生じるが、半径方向の速度成分は微少で概ね一次元流れと見なせる。よって、AJ ノズルから噴出する混合噴流の運動量流束 M_t は、式(6)に示すように M_1 と M_2 のスカラー和で求められ、これを合計流量で除せば、式(7)に示すように混合噴流速度 v_t が得られる。

$$M_t = M_1 + M_2 \quad (6)$$

$$v_t = \frac{M_t}{Q_1 + Q_2} \quad (7)$$

(2) 算出された流速の検証

算出された流速の妥当性を確認するため、高速度ビデオを用いて噴流を撮影し、実際の流速を測定した。噴流の速度は、図-3 に示すように遮へい板により瞬間的に遮断し、噴流の後尾の位置変化を 1000 フレーム/s のフレーム間の移動量から求めた。WJ ラインの噴射圧力は、噴流の後尾の移動量がフレーム内に納まるように 50MPa に設定した。

その結果は表-1 に示すとおりである。また、写真-1 および写真-2 は、閃光時間 2μs 以下のフラッシュで撮影した静止画像である。表-1 からわかるように、AJ ライン単独の噴射の場合も、超高压混合噴射の場合も、実測した噴流の速度は、運動量保存則から算出した噴流速度と概ね一致しており、運動量保存則が成立することを示している。

4. 水中における噴流の動圧の測定

文献 8) には動圧の測定についての詳細が報告されている。ここでは、本研究で行った動圧の測定実験の方法とその結果の概要を示すことにする。

(1) 実験方法

a) 圧力容器

写真-3 は圧力容器の外観を示している。圧力容器には、様々なスタンドオフ距離 SD (二液混合ノズル出口から動圧測定位置までの距離) における噴流状態を観測するため、観測用窓と測定用窓を 330mm ピッチにそれぞれ 6 か所装備している。圧力容器は水深 50m までの環境を再現できるように耐圧 0.5MPa とし、圧力は容器の上部フランジに取り付けた圧力調整弁によりコントロールする。ノズルの装着部は、写真-4 に示すように、掘進機の面盤とチャンバーを模擬して隔壁で仕切るようにしてある。

図-3 画像による流速測定方法概要図

表-1 算定流速と実測流速の比較

実験項目		単独噴射	混合噴射
[1]AJライン	噴射圧力	MPa	0.2
	ノズル径	mm	6.0
	質量流量	kg/s	0.5
	噴流速度	m/s	18.1
	運動量流束	kg・m/s ²	9.3
[2]WJライン	噴射圧力	MPa	50.0
	ノズル径	mm	1.35
	質量流量	kg/s	25.5
	噴流速度	m/s	316.2
	運動量流束	kg・m/s ²	134.6
[1]+[2]		運動量流束	kg・m/s ²
混合噴流の算定速度		m/s	18.1
画像解析	移動量/1ms	mm	16.0
	噴流の実測流速	m/s	16.0

写真-1 AJライン単独噴射状況

写真-2 2液混合噴射状況

写真-3 圧力容器の外観

写真-4 圧力容器内のノズル装着部と隔壁

図-4 動圧測定センサ

図-5 動圧測定センサの配置状況

b) 動圧測定センサ

超高圧ジェット噴流の動圧は、噴流の半径方向に分布する。このため、図-4 に示すピトー管式のセンサを、所定の速度で噴流軸と直交する方向に移動できるような移動装置を製作し、図-5 に示すように圧力容器の測定用窓に装着した。噴流軸と直行する方向の移動は、電動スライダで、スタンドオフ距離の調整は、移動装置の切り替えとノズル位置の微調整で実施した。

c) 実験条件

実験は超高圧噴射システムを用いた地盤改良を想定し、SD と容器内の圧力とをパラメータとして行った。この地盤改良システムの稼働時の標準仕様は、WJ ラインの噴射圧力が最大 245MPa、噴射流量が 55L/min で、AJ ラインが流量 70L/min である。実験では、WJ ラインの圧力を実験用ポンプの最大圧力である 200MPa に、AJ ラインの噴射流量を 70L/min に固定した。

(2) 実験結果

a) 動圧分布

図-6 は、容器内の圧力を水深 0.5m 相当に設定して噴射したときの動圧分布をそれぞれ SD ごとに示したものである。この図をみると SD=2mm では動圧が高く立ち上がり測定幅（噴流幅）が狭いが、SD が 50mm、100mm、200mm と大きくなるほど噴流幅が広がっていることがわかる。これは噴流がもつ運動量が周囲の水に遷移したためと考えられる。動圧の減少は急激で、SD=2mm の最大動圧に比べて SD=100mm では約 1/5 に、SD=200mm では 1/10 以下になっている。

図-6 動圧スタンドオフ距離—動圧分布測定結果

図-7 噴流軸中心部の動圧測定結果

図-8 噴流幅の測定結果

図-9 噴流幅拡大の模式図

b) 噴流軸中心部の動圧と噴流幅

図-7 および図-8 は、水深 0.5m 相当、10m 相当、20m 相当の 3 ケースで容器内の圧力を調整して、SD と噴流軸中心部の動圧および噴流幅との関係を示したものである。また、動圧分布や噴流幅の変化を視覚的に把握するため、SD と噴流幅を同一のスケールとした模式図を図-9 に示す。図の分布は、実験で得られた幅と最大値を二次曲線で結んだ。SD が大きい位置の分布を識別可能とするため動圧分布に変えて速度分布を用いた。

軸中心部の動圧は SD が大きくなるとともに減衰し、SD=400mm では 130kPa、SD=800mm では 20 kPa まで低下した。この値は比較的軟弱な粘性土の一軸圧縮強さ以下に相当する。一方、水深（容器内の圧力）が増加しても軸中心部の動圧や噴流幅には変化が見られず、どの水

深でも同様の噴流構造となっていることがわかる。

すなわち、超高压噴射システムを用いた地盤改良では、被圧の大小は地盤の掘削能力に影響しないことが確認できる。また、噴流幅は、SD が大きくなるほど周囲の水を取り込み拡大した。SD=900mm の場合の噴流幅は、ノズル出口付近の幅の約 25 倍になった。結果として、高速でかつ小径の超高压二液混合噴流は、SD の増加とともに低速で噴流径の大きな流れに変化していくことが確認できた。

(3) まとめ

以上の検討の結果、本超高压噴射システムを用いた地盤改良では、噴流が AJ ノズルから噴出した時点では、一般の噴射攪拌式地盤改良工法の技術資料⁹⁾に記載されている噴射圧力(18MPa 以上)と同程度の圧力となっており、通常 18~100N/mm²程度の圧縮強度とされる¹⁰⁾コンクリート構造物に損傷を与える圧力レベル以下となっていることがわかった。また、動圧はノズルからの距離が長くなればなるほど大きく低下し、距離が 1000mm の位置では、粘性土地盤の掘削限界に至る。すなわち、本超高压噴射システムを用いた地盤改良では、近接構造物を損傷する可能性は極めて低いことが確認できた。

5. 水中における噴流の流動特性の FVM 解析

水中における動圧の計測実験で得られた測定値の妥当性を検証するとともに、掘削空間における噴流の流動状態および掘削空間の内壁に作用する力を把握するために FVM 解析を実施した。

(1) 定常解析モデル

解析には 2 次元軸対称モデルを用いた。解析条件は、表-2 に示すとおりである。解析は掘削の進行にともなう空間の拡大を模擬するために、解析領域の直径 D および長さ L を変化させて行った。

図-10 はメッシュ分割の一例を示したものであり、同図には解析領域を便宜上区分け(以下ゾーンと呼ぶ)をして示してある。ゾーンは後述する地盤掘削実験の容器の形状を考慮して定めた。図で axis は噴流軸で、これを中心に軸対象としている。wall-side は容器の内壁、wall-end は容器の先端の境界である。wall-inner の左はチャンバを模擬しており、上部に排出口として outlet を設けた。また、Inlet はノズルの先端を表し axis 上の wall-inner との交点に設置した。ノズルの周辺には直径 200mm の通水口を設けている。inlet は半径 5mm の速度境界とし、実測で得られた SD=2mm の動圧分布を速度分布に変換して与え、一方、outlet は圧力境界として大気圧を与えた。

表-2 解析条件

解析コード	ANSYS FLUENT 定常解析						
座標	2次元軸対称						
乱流モデル	Realizable k-epsilon+Enhanced Wall Treatment						
解析形状	長さ L mm						
直径 600mm	600	800	1,000	1,200	1,400	1,600	
直径 800mm	600	800	1,000	1,200	1,400	1,600	
直径 1000mm	600	800	1,000	1,200	1,400	1,600	1,800

図-10 メッシュ分割と解析領域

混合ノズルの噴射条件は、動圧測定と同様に、WJ ラインの圧力を 200MPa, AJ ラインの噴射流量を 70L/min に固定した。

(2) 解析結果

図-11 は動圧分布の実測値と解析値との関係の一例を示したものである。図-11 の上図は inlet の入力値を示している。図-12 は SD の増加にともなう動圧分布の中央値と分布幅の変化を示している。これらの図から解析値は動圧分布形状、SD の増加にともなう中心動圧と分布幅の変化が、ともに実測値を精度よく表しており、解析値と実測値双方の妥当性が確認できる。

掘削の進行にともなう噴流の流動状態の変化を模擬するため、wall-end の位置を移動させて解析した結果を図-13 および図-14 に示す。図-13 は inlet を始点とし、要素毎にベクトルの方向のみを考慮して速度ベクトルを接合した線を描いたもので、ノズルから噴出した流体の軌跡を示している。速度は色で表示している。接合要素数を 10000 に設定したため相当数の循環流れを表している。

図-14 は容器径 800mm の場合の速度ベクトルを示している。これらの図から、噴流は wall-end に到達すると半径方向の流れとなり、wall-side に向かい、さらにその流れは wall-side に沿い wall-inner 方向に戻る。戻った流れは一部が通水口から outlet に排出され、残りはノズルから高速噴流に巻き込まれることがわかる。境界の壁に作用する力は、壁に垂直の速度成分によるよどみ点の圧力(せき止め圧)と壁に平行な流れによるせん断力(掃流力)であるが、wall-end の中央部と wall-side の wall-end 近

図-11 動圧分布の実測値と解析値
(D1000, L1800)

図-12 SD増加に伴う中心動圧と噴流幅の変化
(D1000, L1800)

図-13 掘削の進行に伴う流体の軌跡

傍ではせき止め圧が卓越し、それ以外の部分には掃流力が作用している。いずれの力も掘削の進行 (L の増大) にともない低下し、掘削限界に至ると推定される。

図-15 は wall-end に作用する静圧を示している。半径 0m 付近の中央部では噴流による大きな静圧が生じており、図-14 から明らかなように中央部で地盤の掘削が進行する。また、半径の拡大にともない静圧は低下し負圧になる。これは、wall-end における放射状の流れにともなう現象で半径方向の慣性力と流体の連続性の維持とが絡み合っているためと考えられる。この流れが wall-side に接近すると、せき止められ再び静圧が上昇する。この圧力は図-15 から分るように、 D が小さいほど、 L が短いほど大きく、地盤の強度以上であれば、掘

削面の周縁部が掘削されて、掘削空間の径が拡大する。

この現象は、前述の水中における噴流の動圧測定実験のように、境界条件を考慮しない噴流の拡大とは異なり、掘削領域の境界が作る流れと境界に作用する力により掘削が進行することを表している。

図-14 掘削の進行に伴う速度ベクトルの変化

図-15 wall-end に作用する静圧

(3) FVM 解析のまとめ

FVM 解析は実際の現象を精度よく表現できた。結果として、水中に噴射された混合噴流は、周囲の水を巻き込み噴流幅が増大すること、噴流は掘削空間内で循環する流れを作り、掘削領域を前方のみならず半径方向にも拡大すること、その結果、ノズルを移動することなく広範囲の地盤改良が可能となることなど、掘削領域の境界である地盤への混合噴流の作用が明らかとなった。

6. 模擬地盤の掘削実験

(1) 可視化用透明容器の製作

これまでの動圧分布の測定結果から、ノズルを固定して噴射した場合には、掘削径は圧力容器の径より小さくなることが予想される。そこで、掘削過程を可視化する目的で、圧力容器内に小口径の透明なアクリル容器を装着し、その内部に充填した模擬地盤を作り、それを超高圧噴射を用いて掘削して、その状況を外部からビデオで撮影することとした。これにより掘削過程を目視することができ、かつ被圧水下での実験も可能となるが、アクリル容器の適正な大きさが不明なことから、長さは1500mmとし、内径は200mm, 300mm, 450mmの3種の容器を作成して実験を行った。写真-5 は圧力容器内にアクリル容器を挿入している写真である。

写真-5 透明アクリル容器設置状況

写真-6 模擬地盤の作成状況

(2) 模擬地盤の作成方法

模擬地盤は軟弱粘性土、硬質粘性土、砂質土の3種とし、表-3に示した配合で作成した。このうち砂地盤は、ミキサーによる混練が困難であるため、まず、セメントミルクを混練し、その中に砂を投入する方法で作成した。写真-6は模擬地盤の作成状況の写真である。

(3) 可視化容器を用いた掘削実験

地盤掘削実験は3種類の模擬地盤に対して、表-4に示す条件で実施した。

写真-7は掘削前面の位置のビデオ映像である。また、図-16および図-17は、粘性土地盤と砂質土地盤について、それぞれの噴射時間と掘削前面の位置との関係を示したものである。これらの図には実験を行う直前に実施した模擬地盤のモールドサンプルの一軸圧縮強さを併記してある。図中には掘削実験を行った模擬地盤の一軸圧縮強さとアクリル容器の内径を示している。

図-16および図-17からわかるように、いずれの地盤においても、掘削距離が400mm程度までは高速で掘削され、600mm以上になるとその進行が著しく遅くなる。

表-3 模擬地盤の配合

軟弱粘性土地盤(1m ³ あたり)				
シリカヒューム	水	W/C	ベントナイト	計
kg	kg	%	kg	kg
150	902	601	100	1153
硬質粘性土地盤(1m ³ あたり)				
シリカヒューム	水	W/C	ベントナイト	計
kg	kg	%	kg	kg
240	866	361	96	1202
砂地盤(1m ³ あたり)				
シリカヒューム	水	W/C	砂(珪砂5号)	計
kg	kg	%	kg	kg
116	387	334	1580	2083

表-4 模擬地盤の掘削条件

項目	条件	単位	設定値
[1]AJライン	噴射圧力	MPa	1.0
	ノズル径	mm	6.0
	噴射流量	ℓ/min	68.6
	噴流速度	m/s	40.5
	運動量流束	kg・m/s ²	51.2
[2]WJライン	噴射圧力	MPa	220.0
	ノズル径	mm	1.4
	噴射流量	ℓ/min	53.6
	噴流速度	m/s	663.3
	運動量流束	kg・m/s ²	592.1
[1]+[2]	運動量流束	kg・m/s ²	643.3
混合噴流の算定速度		m/s	315.2

写真-7 模擬地盤の掘削状況

図-16 粘性土地盤の掘削距離

図-17 砂質土地盤の掘削距離

図-18 模擬地盤の強度と掘削距離

これは図-7 の噴流軸中心部の動圧測定結果によれば、SD=400mm における中心動圧は 100kPa 以上であり、地盤強度の倍以上の圧力となっている一方、SD=600mm では 45kPa で地盤強度と同程度となっていることによると考えられる。中心動圧が地盤強度以下の領域でも掘削は進行しているが、これは流速による洗掘の結果と推測される。いずれの条件でも掘削前面は、写真-7 に示すように、ほぼ扁平な形状を維持しながら進行する。なお、いずれのアクリル容器の径においても、容器の内壁に地盤が残存することなく、外部から掘削の進行状況が観察できた。この結果は、粘性土地盤でも砂質土地盤でも掘削径は 450mm 以上確保されていることを示している。また、掘進速度に対する容器の径の影響は、地盤強度を考慮すると明確には認められなかった。

図-18 は地盤の一軸圧縮強さと噴流の到達距離との関係を示したものである。この図をみると、模擬地盤を作成する際の配合は同じにしても、できあがった地盤の強度にはかなりのバラツキがあるが、地盤の一軸圧縮強さが高くなると、噴流の到達距離はほぼ線形で小さくなることがわかる。到達距離は、一軸圧縮強さが 20kPa 以下の軟弱粘性土地盤では 120cm、一軸圧縮強さが 50kPa 以上の硬質粘性土地盤では 80cm から 100cm、砂質土地盤では 130cm から 150cm になる。また、粘性土地盤における到達距離は、砂質土地盤と比較すると、地盤強度が同じであっても小さい。これは粘性土地盤の粘着力によるものと判断される。

7. 混相流モデルによる地盤掘削過程の FVM 解析

地盤の掘削過程を表現するために FVM による非定常解析を行った。表-5 はそれに用いたオイラーの混相流モデルの解析条件を示したものである。解析モデルのメッシュおよびゾーンは図-10 と同様である。このモデルは 2 種類以上の相の異なる物質の運動を扱うことができ、例えば、河川による堆積砂の運搬などを容易に解くことができる。

しかし、粘性土地盤や拘束された砂地盤の掘削問題の場合には、粘性や有効応力のモデル化が難しく、破壊現象を扱える構造解析ソフトとの連成解析を行うという困難に直面する。そのため、ここでは掘削過程を定性的に捉えることに主眼を置き、地盤を高粘度の流体と砂の混合物でモデル化して、実験結果を近似できるような粘性係数を逆算した。粒子への運動量の伝達には、抗力係数を用いた。

図-19 は掘削の進行状況を体積分率で表した経過時間ごとの解析結果である。体積分率は、地盤を模擬した高粘性流体がどの程度の割合で噴射流体に置換されたかを

示す比率で定義した。したがって、粘性流体が完全に置換された場合には、体積分率は 1 となる。この図をみると、噴流が地盤を掘削していく様子がよくわかる。

表-5 非定常解析条件

解析コード	ANSYS FLUENT 非定常解析		
座標	2次元軸対称		
混相流モデル	Euler-Euler Model		
time step	1s		
密度	高粘性流体	砂(粒径0.5mm)	水
g/cm ³	1.46	2.15	1
計算領域	直径 mm	長さ mm	
D450	450	2500	
D1000	1000	2500

図-19 非定常解析結果 (D1000)

図-20 地盤掘削の解析値と実測値

図-20 は体積分率が 95%の場合を掘削範囲と仮定して、掘削前面の位置の進行状況を掘削実験結果と比較したものである。この図をみると、解析結果は、掘削距離の増加とともに掘削の進行速度が低下して行く傾向を概ね表現できており、混相流モデルは本研究のような問題にも有効な解析手法であると思われる。本研究では、粘度と地盤の種類や地盤強度との関係を定式化するには至っていないが、粘度が $40 \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}$ から $200 \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}$ の範囲では、ほぼ妥当と思われる結果が得られた。

8. まとめ

本研究により得られた知見を、二液混合噴流の動圧分布、地盤の掘削実験および FVM 解析についてまとめると、以下のとおりとなる。

(1) 二液混合噴流の動圧分布

水中において噴射された混合噴流の動圧は、二液混合ノズル出口から動圧測定位置までの距離 SD の増加とともに急激に減少し、 $SD=100\text{mm}$ ではノズルの出口の約 $1/5$ に、 $SD=200\text{mm}$ では $1/10$ 以下になった。一方、噴流幅は、 SD の増加とともに周囲の水を取り込み増大する。 $SD=900\text{mm}$ では噴流幅はノズルの出口付近の約 25 倍となった。この結果は、高速でかつ噴流径の小さな流れが、 SD の増加とともに低速でかつ噴流径の大きな流れに変化していくことを示している。地盤改良用の混合噴流はアプレシブノズルから噴出した時点で、一般の噴射式地盤改良（ジェットグラウト等）と同程度の圧力となっており、コンクリート構造物を損傷する可能性はない。

(2) 地盤の掘削実験

砂質土、粘性土いずれの地盤の場合も、掘削面はほぼ扁平な形状を維持しながら進行する。また、いずれの地盤においてもノズルからの距離が 400mm 程度までは高速で掘削され、 600mm 以上では掘削の進行が著しく遅くなる。これは、 400mm における中心動圧が 100kPa 以上で地盤強度の倍以上あり、 600mm では 45kPa で地盤強度と同程度となっていることによる。

到達距離は地盤強度の増加とともに低下するが、粘性土地盤と砂質土地盤を比較すると、同一の地盤強度では粘性土地盤の方が小さい。到達距離は、軟弱な粘性土地盤では 120cm 、硬質な粘性土地盤では 80cm から 100cm 、砂質土地盤では 130cm から 150cm になる。

(3) FVM 解析

動圧分布の解析値と実測値はほぼ一致した。噴流の流れは前方の壁に衝突し、半径方向に広がり、容器の内壁

に沿って戻る。このとき、掘削前面の中央部のみならず周縁部にも静圧が発生する。この圧力により掘削径が拡大する一方、圧力は掘削距離が増加し、掘削径が拡大すると、それにともない低下する。

また、地盤の掘削現象は、地盤を高い粘度をもつ流体に置き換えることにより、オイラーの混相流モデルを用いて表現することができる。

9. おわりに

本研究で得られた知見は、二液混合噴流を用いた支障物撤去型掘進工法の実工事適用にあたり、混合ノズルの効率化、改良範囲の推定、近接構造物への影響の評価などに活用できるものと考えている。

また、現状では動圧分布などの地盤中の挙動や改良範囲について施工中の計測が困難なものの、今後は計測機器の開発を含め、本工法による施工現場での計測および計測データと本研究との比較を研究課題として取り組み、本工法の安全性及び施工性の一層の向上を図っていく所存である。

謝辞： 本研究をまとめるにあたって、貴重なご助言を賜った東京都下水道サービス株式会社の高橋良文氏、岩佐行利氏に心から感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 宇田川孝之, 吉川静雄, 船越誠, 田村憲: アプレシブジェット水流で地中障害物を切断除去し推進 東京都下水道 第二十二社幹線暫定貯留切替推進工事, トンネルと地下, Vol. 37, No. 10, pp. 29-35, 2006.
- 2) 高橋智, 船橋信行: 「DO-Jet 工法」による地中障害物撤去及び地盤改良の安全で効率的な施工事例, 日本下水道協会 45 回下水道研究発表会講演集, pp. 524-526, 2008.
- 3) 家壽田昌司, 千葉正孝, 北原淳: 既設下水道幹線直下の残置鋼矢板を DO-Jet 工法で切断撤去 東京都下水道 王子西一号幹線シールド, トンネルと地下, Vol. 41, No. 6, pp. 41-48, 2010.
- 4) 家壽田昌司, 千葉正孝, 高谷圭吾: 地下鉄駅直下の残置杭を DO-Jet 工法で切断撤去 東京都下水道 東大島幹線および南大島幹線, トンネルと地下, Vol. 42, No. 2, pp. 41-47, 2011.
- 5) 武山信幸, 中條明彦, 川元克哉: DO-Jet 工法による既設下水道管の防護および基礎杭の切断・除去 東京都下水道 新宿区河田町 市谷本村町付近再構築, トンネルと地下, Vol. 47, No. 3, pp. 19-24, 2016.
- 6) 岡本順, 神山守, 坂本久之: 地中支障物対策を駆使したシールド施工 東京都下水道 王子西一号幹線, トンネルと地下, Vol. 47, No. 8, pp. 59-67, 2016.
- 7) 高橋智, 船橋信行: DO-Jet 工法が周辺地盤に与える影響についての実験報告, 日本下水道協会 46 回下水道研究発表会講演集, pp. 497-499, 2009.

- 8) 神山守, 磯部隆寿, 岩佐行利, 小泉淳: DO-Jet 工法における超高圧 2 液混合ジェット噴流の影響範囲に関する実験的研究, トンネルと地下, Vol. 47, No. 11, pp. 47-52, 2016. 技術資料, pp. 72, 2016.
- 9) 日本ジェットグラウト協会: ジェットグラウト工法 10) 土木学会: コンクリート標準示方書 設計編, pp. 32, 2012.
- (2017. 5. 19 受付)

STUDY ON THE CHARACTERISTICS OF DUAL-FLUID JETS IN GROUND EXCAVATIONS INVOLVING OBSTACLE-REMOVING PIPE JACKING METHOD FOR GROUND IMPROVEMENT

Mamoru KAMIYAMA, Atsushi KOIZUMI, Takahisa ISOBE,
Masahiko TANAKA and Yohei SHIMURA

Widely applied in various projects, this method employs a dual-fluid, ultra-high pressure jet system mounted on an excavator typically used for pipe jacking and shield methods to shear and remove underground obstacles and for ground improvement. While the influences and range of the dual-fluid jets on the surrounding ground have been ascertained through empirical studies, difficulties in performing measurements during excavation have impeded efforts to date to clarify the range of such influences on nearby structures.

This paper attempts to clarify the characteristics of the dual-fluid jet demonstrated during ground excavation by measuring the jet's dynamic pressure and based on observations and FVM analysis (Finite Volume Method) of the excavation processes using a model of the ground. The paper offers numerical grounds for predicting the jet's influence range.

The study led to a number of conclusions: the jet's dynamic pressure immediately after it is injected from the nozzle falls short of the threshold pressure that would pose a risk of damage to nearby structures; the jet's ground excavation processes and flow characteristics within the excavation area can be accurately simulated via FVM analysis.