

報文

高吸水性ポリマー水を

利用した高圧噴射攪拌工法の開発

—コスト削減, 高液性粘土地盤適用を可能とするハイブラスジェット工法—

利根 誠* 赤木 寛一** 下坂 賢二*** 犬野 康年****

1 まえがき

高圧噴射攪拌工法を構成する基盤技術は、ウォータージェット (高速度水流), すなわち細径ノズルから超高压で水を噴射する技術である。ウォータージェット (以下, WJと略記) を用いて対象物を切削・加工する技術は、製造業、鉱業、建設業、医療などの分野で広く導入されている。使用環境条件は分野により異なるが、WJによる喰食を効率化するためには、切削位置における単位噴射量当たりの切削エネルギーを向上させ、かつ維持することが重要な課題となる。これらを実現できれば、所定の破壊エネルギーを確保することが可能となる。改善策の一例として製造業では、金属部品の加工過程において、噴射材 (水) に粘性を付与する手法や研磨材を添加する手法などが実用化されている。

一方、地盤を対象とした高圧噴射攪拌工法においては、切削材に水を使用するのが一般的で、高吸水性ポリマー水溶液を利用して工法として確立した事例はまだ見られない。本工法はこの点に着眼して開発したものであり、併せて多重管モニター (噴射ノズルを持つ装置) の設計も見直すこととした。

2 開発の概要

工法の開発における理論と実証の一部を抜粋して以下に示す。

2.1 高吸水性ポリマー水の噴流特性 (室内実験実験)

粘性流体を高速度で噴射した場合、粘性のない流体に比べて噴流の拡がりや霧化が抑制され、スタンポオフ先における中心速度が相対的に維持される。これは、噴流外縁におけるせん断層の乱れや界面不安定の成長が抑えられ、空気の巻き込みが減少するためと考えられる。

図-1は、ノズルから高圧で噴射された流体の構造概念を模式的に示したものである。流速分布に着目すると、ポテンシャルコアと呼ばれるノズル出口直後の噴流体の最大流速 u_1 が流線軸上でほぼ維持される区間が存在する。ポテン

シャルコアが長いということは、喰食力の向上において有利に働く。

図-2は空中噴射における高速度撮影とPIV (粒子画像流速測定法) の結果である。(a)が水道水を噴射したケース、(b)が高吸水性ポリマー水を噴射したケースである。PIVの解析対象の幅 (x軸) は20cmである。これらの空中噴射実験の結果から、高吸水性ポリマー水の噴射は水噴射に比べて、流速とその距離減衰特性に

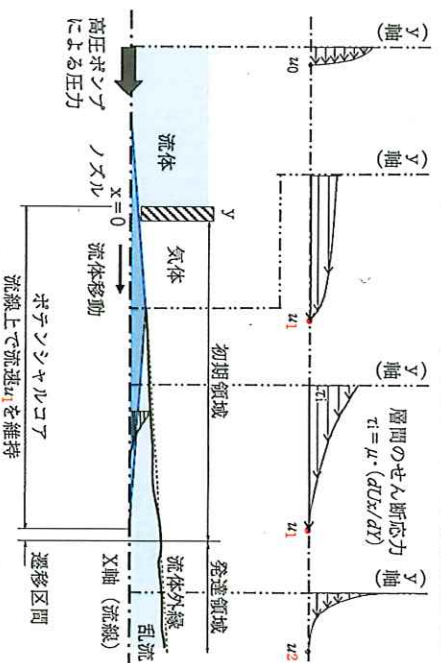


図-1 高速噴流体の速度分布と構造概念

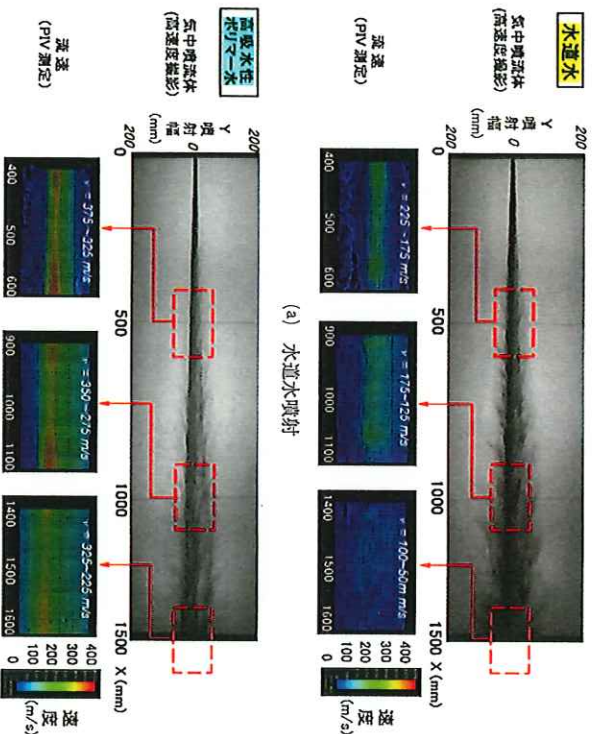


図-2 空中噴流体に対する高速度撮影とPIV測定の結果 (噴射圧力35MPa)

* TONE Makoto 戸田建設(株) 本社 土木設計技術 2部 部長, 博士(工学) 技術士(建設部門)
 ** AKI GI Hirokazu 早稲田大学 名誉教授, 工博
 ** SHIMOSAKI Kenji 戸田建設(株) 本社 技術研究所 社会基盤再生部 部長, 博士(工学)
 *** ONO Yasuichi 大洋基礎工業(株) 技術本部 技術部長, 博士(工学) 技術士(建設部門)
 東京都中央区京橋1-7-1 東京都新宿区大久保3-4-1-55 S-0908B
 東京都中央区京橋1-7-1 愛知県名古屋市中川区柳森町107

表-1 実証実験における地盤条件と確認事項

事例	地盤区分	切削材	確認事項
No.1	砂質土	水、高吸水性ポリマー水	改良体直径の拡大、排泥減量の効果
No.2	砂質土	高吸水性ポリマー水	改良体直径の拡大、排泥減量の効果
No.3	粘性土	水、高吸水性ポリマー水	噴射時間の低減、排泥減量の効果
No.4	細粒分質 礫質砂	高吸水性ポリマー水	改良体直径の拡大、排泥減量の効果
No.5	粘土質 シルト	高吸水性ポリマー水	改良体直径の拡大、排泥減量の効果
No.6	腐植土含む粘性土	高吸水性ポリマー水	高含水粘性土への適用と品質確保



写真-1 改良体の露出状況全景 (事例No.1)

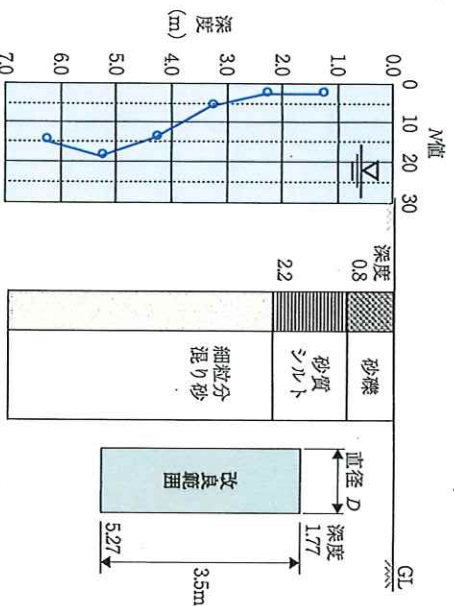


図-3 地盤条件と改良範囲 (事例-1)

において優位であると判断できる。例えば、高吸水性ポリマー水の流速は、飛距離0.5mで $v=375\sim325\text{m/s}$ 、飛距離1.5mでも $v=325\sim225\text{m/s}$ を維持していた。一方、水の流速は、飛距離0.5mで $v=225\sim175\text{m/s}$ 、飛距離1.5mで $v=100\sim50\text{m/s}$ まで減衰する結果となった。PIVによる噴流形状の観察においては、高吸水性ポリマー水は鋭利で直進性を持つ噴流形状を保つが、水の場合は飛距離に従って噴流体外縁に乱れや渦が生じ、流体の拡散が見られた。

この高速噴流実験で得た現象を理論や数値解析で定量的に再現するには現時点では課題が多い。主な理由としては、非ニュートン性のレオロジー特性や相変化・混相に関するモデル同定の不確かさが大きいこと、圧縮性(圧力波・衝撃波)やノズル内キャビテーションの影響の評価が難しいことなどがあげられる。

なお、流体の支配方程式としてはナビエ・ストークス方程式を基礎とし、その右辺において、構成式の修正(レオロジーモデル)や混相・相変化モデルの導入が行われるのが一般的である。

(ナビエ・ストークスの運動方程式)

$$\begin{aligned} X \text{ 軸} \quad \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + f_x(x) + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \\ Y \text{ 軸} \quad \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + f_y(y) + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \end{aligned}$$

流れの加速度 圧力勾配 質量力 粘性勾配

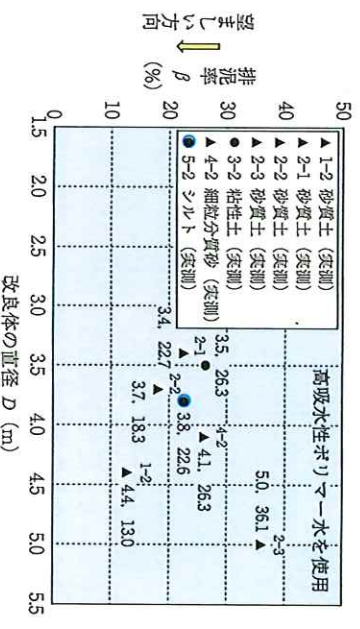


図-4 排泥率 β と改良体直径 D の関係 (No.1~5)

2.2 改良体直径と排泥率の関係 (フイールド実験)

2.2.1 地盤条件

本開発に当たり、砂・粘土地盤を対象としたフイールド実験を行った。いずれも地下水位の高い地盤とした。

表-1に地盤区分と確認事項を示す。

この6例の目的は、No.1からNo.5においては改良体と排泥量の関係性を、No.6においては高含水粘性土への適用性を求めるものとした。

実験に用いた地盤条件(砂質土)と改良範囲の一例を図-3に示す。

2.2.2 実験状況

改良体の造成後、掘削して露出させ形状を計測した。

写真-1は事例No.1の状況である。この改良体は、ロッドに設ける噴射ノズルを対向2孔(上下段とも)として、揺動角度 90° で造成したものである。写真に映る改良体上面の地盤は砂質シルトである。

矩形形状の改良体造成が必要な場合は、このケースのような扇状改良体(部分揺動)を複数組み合わせることで可能となる。なお、通常の円形改良に対しては、一孔噴射(上下段とも)、全周揺動 360° により行われる。

2.2.3 改良体の直径と排泥率の関係

排泥量計測を実施した実験 (No.1~No.5) における、改良体の直径と排泥率の関係を図-4に示す。改良体の直径は3.0m以上となり、最高で5.0mまでの造成が可能となった。排泥率は適用条件(土質)と目的(改良体の大きさ)により変化するが、直径4.0m程度までであれば、排泥率を30%以下に抑えられる結果となった。

ここで、排泥率は以下のように定義した。

$$\beta = E/V \times 100$$

ここに、 β : 排泥率 (%)

E : 排泥量 (m^3)

V : 造成した改良体の体積 (m^3)



写真-2 排泥量Eの計測状況 (10m³鋼製タンク)

$V = 1/4 \pi D^2 \cdot L$
 直径Dと改良体高Lは、改良体を露出させて計測した値の平均値

排泥量は排出した泥土を鋼製タンクに貯めて体積を計測した。その状況の例を写真-2)に示す。

次に、参考として、事例No.1における改良体直径D、排泥量Eおよび排泥率 β の結果を図-5に示す。この地盤条件においては、改良体直径が3.7mのケースにおいて排泥率が最小(良好側)となった。ただし、これは、 $D = 5.0m$ のケースは改良体の大径化(大きさの限界側)を確認するために実施した側面もあるため、 $D = 3.4m$ 、 $3.7m$ の比較において、改良体径と改良率に関する規則性を示しているのではないと判断している。

「所定径の改良体造成において、排泥率が小さいほど改良の効率は大きい」と考えるならば、最も効率的な改良体直径というのは現場条件ごとに異なるものと考えられる。この事例No.1においては、排泥率 β が最も小さい直径 $D = 3.7m$ のケースが、3ケースの中では最も効率的であったといえる。地盤条件(透水性、粒径分布、細粒分、地下水位など)ごとに、改良効率が最大(排泥率 β の最小化)となる適正径が存在すると思われる。精度の高い推定手法が望まれる。

2.2.4 高粘性地盤への適用性向上

高含水粘性土は、自然含水比 w_n および液性限界 w_L が高いため、原位置における地盤切削やセメントスラリーとの混合攪拌が困難な土質に分類される。これは、未攪乱状態では塑性状態にあり自立性を保つ一方で、切削水との接触や攪乱によって土構造が破壊され、含水比が増加して液性限界に近づくと、せん断強度が著しく低下し、泥状化しやすくなるためと考えられる。そのため、高含水粘土地盤における改良体の直径と強度は、砂地盤と比較すると、設計値を小さく見込む配慮が必要である。計画、設計段階でコスト増の一因となる。

このような高含水粘土地盤への適応を図るためには、地盤切削力の向上と泥土の速やかな地上排出が重要となる。また、上段噴射(地盤切削用途)と下段噴射(混合攪拌用途)の相互干渉を避け、セメントスラリーと切削土の原位置攪拌を円滑にすることが、均一な改良体を造

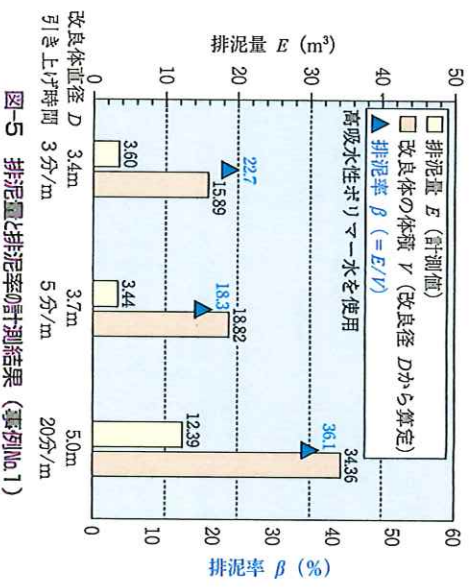


図-5 排泥量Eと排泥率βの計測結果 (事例No.1)



写真-3 噴射モニターの概要

成するうえで重要となる。本工法は、このような改良特性を試験施工などで把握し、上下段噴射孔の適切な離隔Lと配置を持つモニター(ロット)下端に設ける噴射装置を開発した(写真-3)。

3 本工法の効果、優位性

本工法は、高圧噴射攪拌工法の切削材(水)に高吸水性ポリマー水を用いることで地盤切削力を高めるという発想をもとに、それに適した噴射装置や仕様を開発したものである。切削力向上がもたらす効果を、コスト削減、品質向上および環境保全の観点で以下に述べる。

3.1 コスト削減

切削力の向上がもたらす直接的な成果を以下に示す。

- (a)地盤改良体の直径の拡大
 - (b)所定径の改良体造成に要する時間の短縮
- これらをコストの観点で見えた場合、(a)は施工本数の低減に、(b)は施工日数の短縮につながるから、総合的にはコスト削減が可能となる。

図-6に、改良体直径の拡大(1.5m→2.5m)に伴う施工本数の低減効果を概念として示す。施工本数の低減は、改良面積当たりの施工時間の短縮、改良機の設置・移設頻度の低減につながるため、コスト削減に効果がある。

3.2 排泥の減量化

高圧噴射攪拌工法では、地盤切削過程で水が地中に投入され地盤固化用のセメントスラリーが地中に注入されるため、これらの容積増分に相当する排泥物を地上に適宜排出する必要がある。内圧が現地地盤応力を大きく上回

