

環境負荷低減に寄与する地盤改良技術

高吸水性ポリマーを用いた高圧噴射攪拌工法「ハイブラストジェット[®]」を開発

下坂 賢二・利根 誠・大野 康年

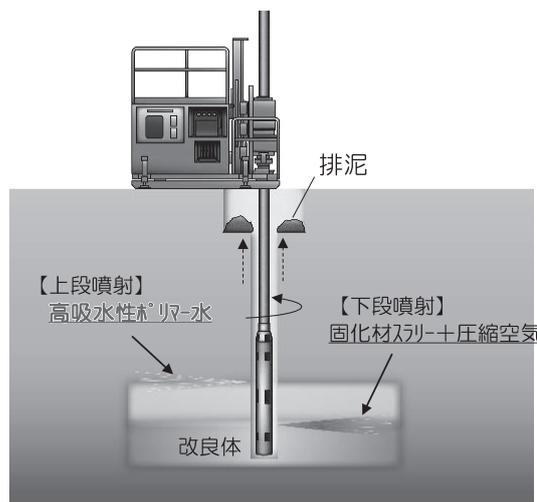
地盤改良工法の1つである高圧噴射攪拌工法は、高圧ジェット噴流によって小型の施工機械で任意の深度に大口径かつ高強度の改良体が造成できる一方、施工時にはセメントを含んだ高含水比の建設汚泥が大量に地上に排出される。著者らは、建設汚泥の減量化を目的に、同工法の地盤の切削水に従来の水噴射に代えて高吸水性ポリマー水を使用することで地盤の切削能力を向上した新たな高圧噴射攪拌工法を開発した。本稿では、高吸水性ポリマー水の要素試験による効果検証とフィールド実証試験について報告する。

キーワード：地盤改良，高圧噴射攪拌工法，建設汚泥，環境負荷低減

1. はじめに

高圧噴射攪拌工法は、小型の施工機械で地中に小さな孔を設けることで、周辺地盤への影響を抑制しながら高圧ジェット噴流によって地盤を切削し、セメント系固化材を地盤に攪拌混合して、強度や遮水性の高い様々な形状や大きさの連続した改良体を構築できる地盤改良工法として広く活用されている。しかしながら、施工時に副次的に排出される多量の排泥は、注入材料に起因するセメント系固化材を含んだ高含水比の建設汚泥で、改良対象となる土質性状によって違いはあるものの、一般的に切削水および固化材スラリーの地盤注入量相当の建設汚泥が発生する。大量に消費されるセメント系固化材、建設汚泥の大量処分は、原材料の生産過程や廃棄物処理過程（運搬、埋立）でCO₂を発生し、建設分野の環境負荷の低減の観点からも、注入量の少ない高効率な改良技術の開発が望まれている。

著者らは、建設汚泥の減量化を目的に、従来の水噴射による切削方法に代えて、水を吸収させた高吸水性ポリマー材の噴射による地盤の切削能力の向上に着目した新たな高圧噴射攪拌工法を開発した¹⁾ (図—1)。切削水に掘削安定液として実績のある粘性を有する高吸水性ポリマー水²⁾を用いることで、緩んだ地盤の安定性の確保と水噴流の拡散抑制効果により切削効率を向上し、セメントスラリー造成時には、高吸水性ポリマーは水を排出し粘性低下するため、排泥の地上への排出を阻害することなく、残存しないことから造成体の品質への影響も少ない。本稿では、高吸水性ポリマー水の各種試験による効果検証とフィールド実証試

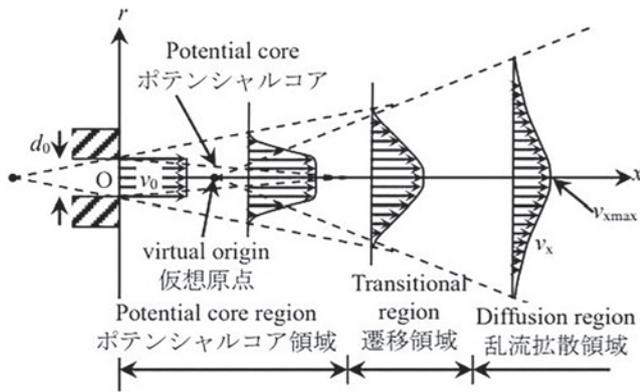


図—1 ハイブラストジェット概要図

験を通じて得られた本工法の有用性を報告する。

2. 既往の研究

高圧噴射による水噴流の構造モデルとして、図—2のような流速分布概念図が既往の研究³⁾で明らかにされている。水噴流は、ノズル出口での噴射速度が持続されるポテンシャルコア領域、速度乱れの発達段階である遷移領域、十分に乱れが発達した乱流拡散領域からなる。高圧噴射の切削能力向上には、噴射拡散を抑制しポテンシャルコア領域をできるだけ長くとることが重要であり、これまで圧縮空気を噴射物の周りに同伴させ気液境界面を形成し拡散を抑制する手法や、ノズル形状や流路管等の噴射機構を改良した工法が開発されている。その中で増粘剤等の高分子材料は、粘

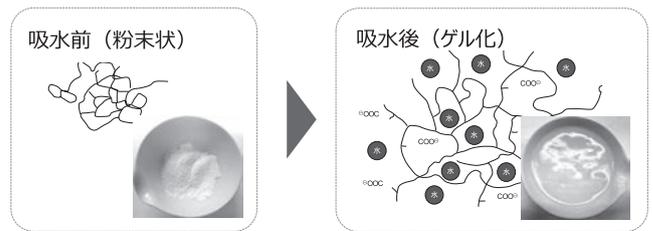


図一2 噴射流体の流速分布概念図³⁾

性効果により水噴流の乱れを減少させるものとして古くからその有効性が確認されており、特にノズル上流の乱れの減衰や水噴流の拡散抑制、鉄板壊食やコンクリートにおける壊食量増大に対しては、顕著な効果があることが既往研究⁴⁾より報告されている。しかしながら高圧噴射攪拌工法の実工事では、高分子材料を添加した水溶液は、粘性付与により地盤切削時の孔壁保護に寄与するものの、切削した土砂スラリーの粘性が高く流動性が十分に得られないため、地上への排泥排出を阻害し固化材スラリーとの置換性が低下する課題があった。これらの課題に対し、著者らは、粘性流体で地盤掘削の孔壁安定液として実績があり、外的状況変化によって吸水状況が変動する特性や固化材スラリーとの置換性がある高吸水性ポリマー材を用いた水溶液に着目しその有効性を検証した。

3. 高吸水性ポリマー水

高吸水性ポリマー材は、自重の数百倍の水を吸水してゲル化し、その水を保持する機能を有している。1960年代に、園芸用の土壌保水剤などの用途として開発され、現在では紙おむつやナプキンなどの衛生用品のみならず、農業・園芸、食品・流通、土木・建築、化粧品、メディカル、電気・電子産業分野でも使用されている。その用途に応じて多くの組成や製法が多岐にわたって開発されているが、本工法で用いる高吸水性ポリマー材は、アクリル酸を主体とした材料で、原料および生産工程に重金属のような環境汚染物質は使用しておらず、環境への影響が極めて小さい材料である。化学的には、部分的にナトリウム塩を形成したカルボキシル基を多数有する高分子が3次元的に架橋された分子構造で、水が存在すると、カルボキシル基がイオン化し、遊離したナトリウムイオン濃度に



図一3 高吸水性ポリマーの吸水概念図

よって生じる浸透圧で分子鎖間に水が入り込み、図一3に示すように分子鎖の魚網の網目に水が取り込まれた状態となる。ただし、 Ca^{2+} 等の多価金属イオンや分子鎖内部よりもイオン濃度が大きい液体と接触すると、内部から水が放出され水に近い流動性となる特性がある。

高吸水性ポリマー水は、水と吸水膨張させた高吸水性ポリマー材が懸濁した水溶液で、必要な粘性を配合量によって調節できる特徴を持っている。この高吸水性ポリマー水の特性を活用し、切削時は粘性流体の拡散抑制効果による地盤切削能力の向上と切削により緩んだ地盤の安定化を図り、造成時は Ca^{2+} を含むイオン濃度の高い固化材スラリーとの接触により、吸水した水を排出・粘性低下し、地上への排泥排出を阻害することなく改良体の造成が可能となる。

4. 高吸水性ポリマー水の効果検証

高圧噴射攪拌工法は、地盤中に噴射される流体の種類の数によって噴射方式が異なり(表一1)、噴射方式の中でも施工効率が高い三相流方式は、上段ノズルからは切削材としての水と圧縮空気が高圧(35 MPa前後)で噴射され、下段ノズルからは固化材スラリーと圧縮空気が高圧(2~40 MPa)で噴射される。ノズルから大気中に噴射された流体は、その進行に従い、速度の減少を伴いながら拡散していくが、地盤に対する切削力を高めるためには、流速の向上と噴射流体の距離減衰の抑制が重要となる。従来の水噴射と高吸水性ポリマー水の違いを検証するため、流体噴射装置(以降、噴射モニタと称す)を用いて気中噴射(圧力35 MPa)し、高速度カメラによる噴流状況の可視化とPIV(粒子画像流速測定法)による流速計測およ

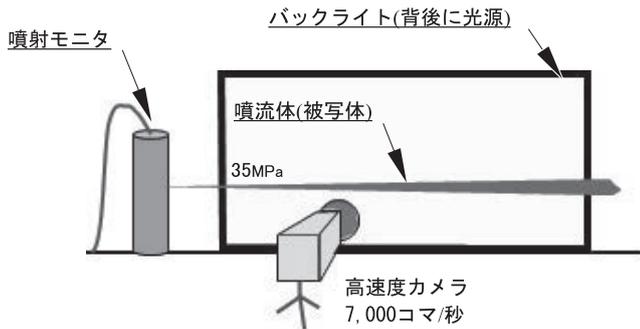
表一1 噴射方式と噴射流体

噴射方式	流体
単相流 (単管式)	固化材スラリー
二相流 (二重管式)	固化材スラリー+圧縮空気
三相流 (三重管式)	切削材(水)+圧縮空気+固化材スラリー

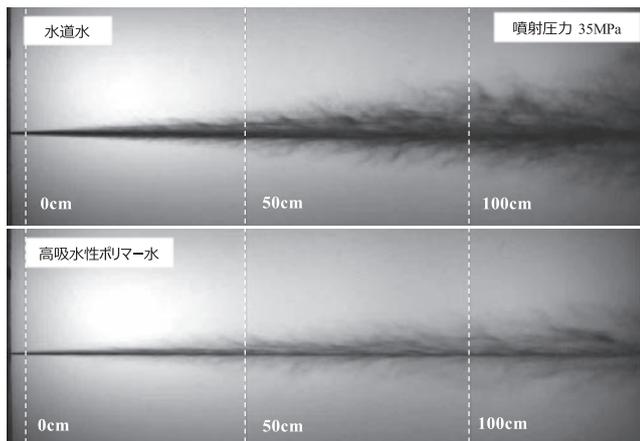
び受圧板を用いた切削効果検証試験を実施した。

(1) 高速度カメラによる噴射撮影

高速度カメラによるバックライト撮影は、カメラのセンサーに対して直接光が入るように照明を設置し、逆光現象を利用して、カメラと照明の間に置いた被写体を撮影するものである。噴射モニタから水道水と高吸水性ポリマー水を圧力 35 MPa の同条件で噴射し、噴射状況を比較した。高速度カメラ撮影概要図を



図一4 高速度カメラ撮影概要図

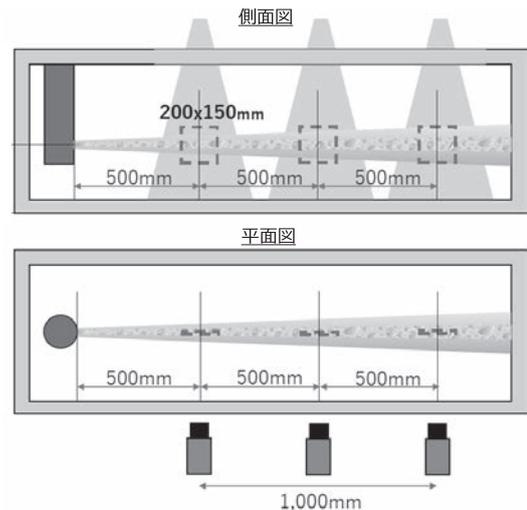


図一5 高速度カメラによる噴射比較

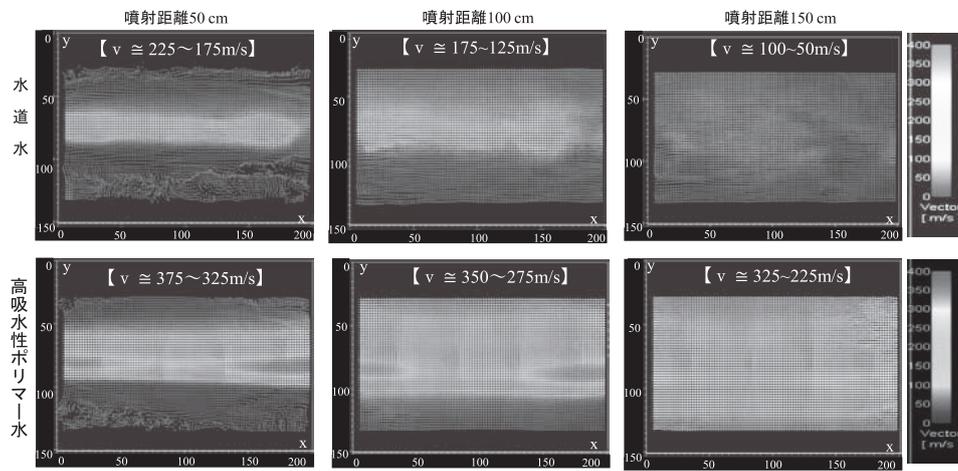
4 に、高速度カメラによる噴射比較を図一5に示す。両噴射体の噴流状況を比較すると、高吸水性ポリマー水は、水道水と比べてノズル口元から噴射先までの空気抵抗による拡散が少なく、噴射速度が持続されるポテンシャルコア領域が長いことが確認できる。

(2) PIV (粒子画像流速測定法) による速度計測

PIV (Particle Image Velocimetry) は、流体中の粒子画像により流れ場における多点の瞬時速度を非接触で得ることができる流体計測手法である。その原理は、流体に追従する粒子にレーザシートを照射することで可視化し、これをカメラで撮影しフレーム間の微小時間 Δt における粒子の変位ベクトル Δx を画像処理により求め、流体の局所速度ベクトル $v \cong \Delta x / \Delta t$ を算出する。前記の高速度カメラ撮影と同条件で、水噴射と高吸水性ポリマー水噴射の PIV 計測を実施した。計測概要図を図一6に、計測結果を図一7に示す。



図一6 PIV 計測の概要図



x軸は噴射軸方向距離(mm), y軸は噴射軸直角方向距離(mm)

図一7 PIV 計測結果 (上段: 水道水, 下段: 高吸水性ポリマー水)

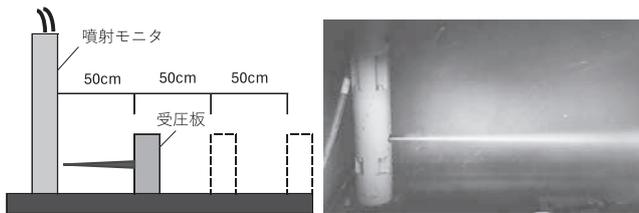


図-8 試験装置・噴射状況

表-2 試験条件

項目	仕様
ノズル口径	2.1 mm
噴射圧力	35 MPa
噴射流量	50 l /min
噴射時間	2分
噴射距離	50, 100, 150 cm

水噴射の平均流速は、約 50 ~ 225 m/s の範囲である一方、高吸水性ポリマー水の平均流速は約 225 ~ 375 m/s の範囲にあり、初速も高く噴射距離 150 cm の位置においても 300 m/s に近い速度を維持している。また、噴射距離 50 cm と 150 cm の二地点間の流速の減衰比を比較すると、高吸水性ポリマーは 0.60 (=225/375)、水道水は 0.22 (=50/225) となり、高吸水性ポリマー水を用いたジェット噴流は、水道水を用いた場合よりも流速の距離減衰が小さいことを示している。

(3) 切削効果検証試験

噴射物（水、高吸水性ポリマー水）の違いによる切削効果を検証するため、気中噴射による切削効果検証試験を実施した。試験は、気中において噴射モニタを鉛直に設置し、ジェット噴流をコンクリート製受圧板（圧縮強度 20 N/mm²、寸法 19 cm×19 cm×10 cm）に向けて水平噴射し、受圧板壁面に衝突させることで、壊食されるコンクリート受圧面の切削深さと体積減少量を測定した。試験装置・噴射状況を図-8に、試験条件を表-2に示す。

試験結果は、噴射距離と最大切削深さの関係を図-9に、噴射距離と壊食による体積減少量の関係を図-10に、受圧板切削状況を写真-1に示す。高吸水性ポリマー水は、水噴射と比較して最大切削深さは水噴射の 1.5 ~ 2 倍以上の増加、体積減少量で 1.3 ~ 1.8 倍の増加がみられた。また、噴射距離 50 cm 地点より 150 cm 地点における最大切削深さの減衰は、水噴射では 0.7(=17/24) の減衰比に対して、高吸水性ポリマー

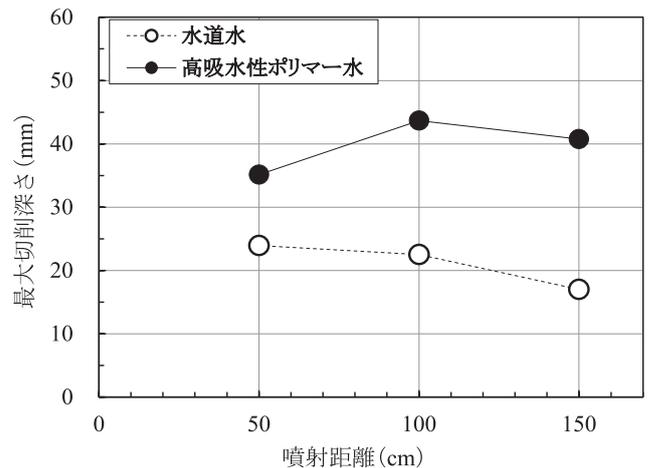


図-9 最大切削深さと噴射距離の関係

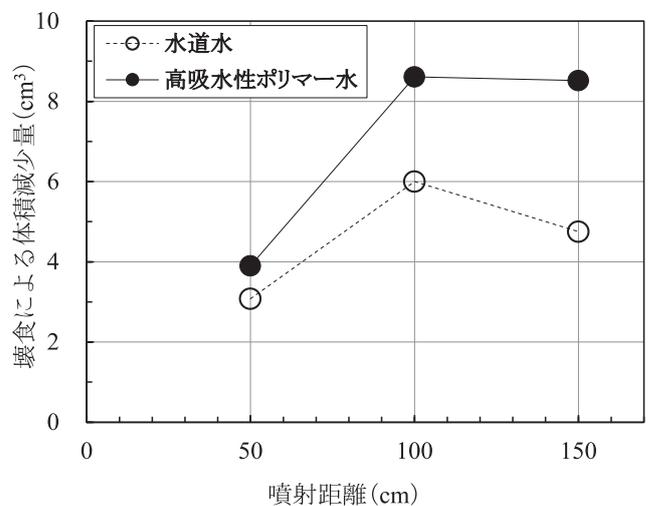


図-10 壊食による体積減少量と噴射距離の関係

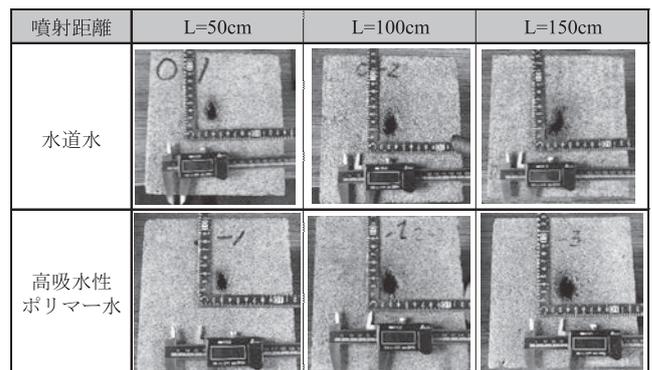


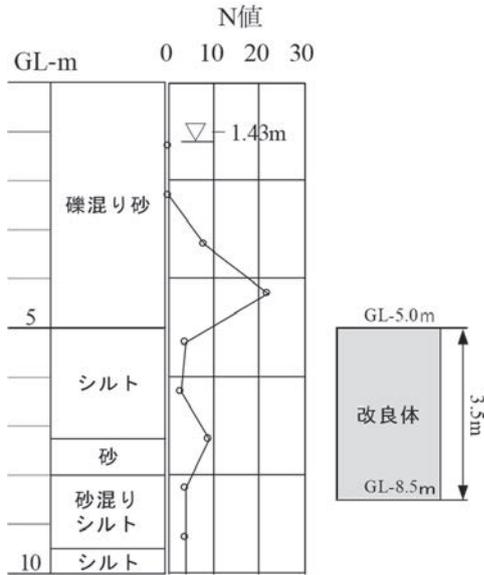
写真-1 受圧板切削状況

水は減衰が生じておらず、体積減少量も噴射距離による減衰は生じていない。

5. フィールド実証試験

(1) 試験フィールドの概要

試験フィールドは、地下水位の高い旧畑地で、対象



図一 11 土質柱状図と改良位置

地盤は、N 値 10 以下の軟弱な砂・粘土の互層地盤である。改良範囲は、改良体上端の土被り 5 m、改良造成長 3.5 m で、改良対象地盤は、N 値が 3 を下回るシルト層が 2.5 m、N 値が 9 を下回る砂層が 1.0 m である。土質柱状図と改良位置を 図一 11 に示す。

(2) 試験ケース

試験は、地盤改良用の専用固化材を用いて、切削材とロッド引上げ時間 (分/m) の違いによる改良体の出来形品質と排泥量を比較検証した。ここに、引上げ時間(分/m)とは、一定の回転数で噴射するモニタを、地中の下方から上方へ段階的に引上げるにあたり、改良長 1.0 m 当たり要する時間を示すものである。施工は、上下二段の噴射口を有する噴射装置 (モニタ) を用いて、上段より切削材、下段より固化材スラリーおよび圧縮空気を噴射し、モニタ中心から 180 度、GL-5.0 ~ -8.5 m の 3.5 m 層厚の改良体を造成した。

試験ケースの諸元を表一 3 に示す。ケース 1 は従来の切削水に水道水を用いたもの(引上げ時間 10 分/m)で、ケース 2 ~ 4 は切削水に高吸水性ポリマー水を用いて、噴射モニタの引上げ時間を、10、12、8 分/m に変化させたケースである。

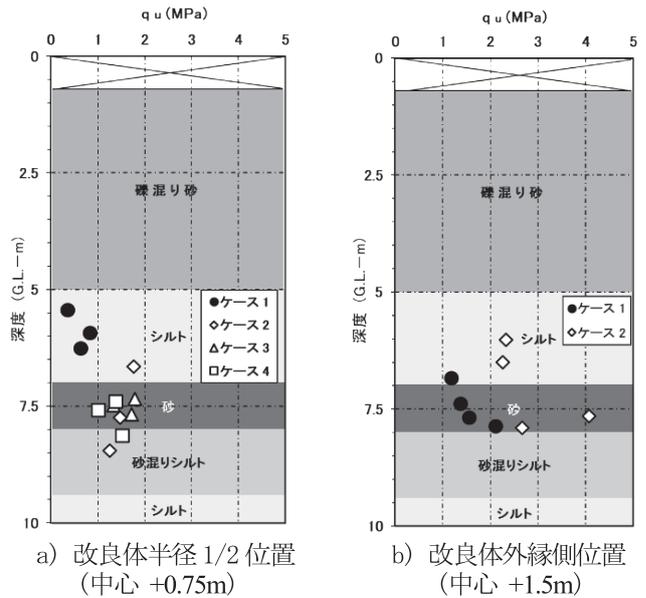
(3) 試験結果

(a) 改良体の出来形品質

改良体の出来形品質を確認するため、造成後に各ケースの改良体コアをボーリング採取し、一軸圧縮強度試験を実施した。コアの採取位置は、各ケースの改良体径の中心から 0.75 m、1.5 m の 2 箇所である。一軸圧縮強さの深度方向分布図を 図一 12 に示す。地盤

表一 3 試験ケースの諸元

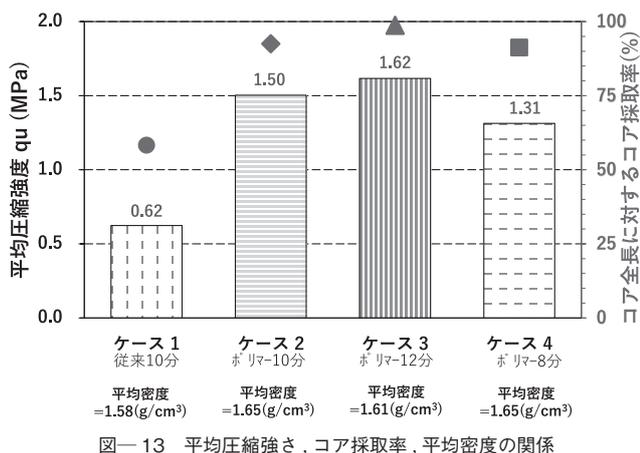
項目	ケース 1 (従来)	ケース 2	ケース 3	ケース 4
引上げ時間 (分/m)	10	10	12	8
回転数 (rpm)	1.6			
引上げ間隔 (cm)	2.5 (ステップ式)			
上段				
切削材	材料	水	高吸水性ポリマー水	
	噴射圧力 (MPa)	35		
	噴射流量 (L/分)	100		
吐出口内径 (mm)	2.1			
	吐出内径 (mm)	2.1		
空気	圧力 (MPa)	1.0	-	
	流量 (m ³ /分)	3 ~ 6	-	
下段				
固化材	材料	水 + 専用固化材		
	W/C (%)	90		
	噴射圧力 (MPa)	35		
	噴射流量 (L/分)	190		
	吐出内径 (mm)	3.15		
揺動角度 (度)	180			
空気	圧力 (MPa)	1.0		
	流量 (m ³ /分)	3 ~ 6		



図一 12 一軸圧縮強さ q_u の深度分布図

種別の一軸圧縮強さに着目すると、水道水 (ケース 1) と比べて高吸水性ポリマー水 (ケース 2, 3, 4) の方が各土層とも優位にあり、地盤切削性が低いシルト層では、水道水 (ケース 1) は設計改良強度 0.5 MPa に満たない箇所もみられた。

各ケースの改良体の平均一軸圧縮強さ、コア採取率、平均密度の関係図を 図一 13 に示す。ケース 1 (従来) に比べて、高吸水性ポリマー水を用いたケース 2, 3, 4 は平均一軸圧縮強さ・コア採取率・改良体密度ともに大きくなる傾向を示し、高吸水性ポリマー水を用いた地盤切削能力の向上は、固化材の分散性を良好



図一 13 平均圧縮強さ，コア採取率，平均密度の関係

表一 4 排泥量の計測結果

項目	ケース				備考
	ケース 1 (従来)	ケース 2	ケース 3	ケース 4	
引上げ時間 γ (min/m)	10	10	12	8	
改良体直径 (m)	3.0	3.5	3.5 以上	3.0	
造成長 L (m)	シルト	2.25			
	砂質土	1.25			
増加率 α	粘土	0.15			
	砂質土	0.10			
切削水吐出量 q_w (L/分)	50 × 2 = 100				
固化剤スラリー吐出量 q_c (L/分)	95 × 2 = 190				
計画排泥量* (m ³)	高炉セメント a	15.89	-	-	添加量 306 kg/m ³ 相当
	専用固化材 b	11.35	11.35	13.61	9.08
実測排泥量 (m ³)	専用固化材 c	10.79	10.68	13.00	8.87
排泥量減少率 (%)	注入材効果	29 (↓)	-	-	計画値比較 (a-b)/a
	切削水効果	-	1 (↓)	20 (↑)	ケース 1 実測比較

* 計画排泥量 $Q = \Sigma L \times \gamma \times (q_w + q_c) \times (1 + \alpha)$

にし、改良体の連続性や強度等の改良体品質を高めることが確認された。

(b) 排泥量

排泥量の計測結果を表一 4 に示す。従来ケース 1 (10 分/m 水道水) と同一径 ($\phi 3.0$ m) の改良体を造成したケース 4 (8 分/m ポリマー水) に着目し排泥量を比較した。ケース 1 と 4 の施工条件の違いは、切削水の種類、引上げ時間であり、同一 (径、長さ) の改良体を造成する場合、切削水に高吸水性ポリマー水溶液を使用すれば、従来に対し排泥量を 18% 削減できる効果が得られた。また、ケース 1 において、従来の固化材を一般的に使用される高炉セメント (配合試験による固化材添加量 306 kg/m³ 相当) とした場合、専用固化材 (配合試験による固化材添加量 217 kg/m³) を用いたことによる排泥量減量率は 29% (11.35/15.89=0.71) となり、注入材減量の効果 (造成時間短縮 10 分→8 分) と高吸水性ポリマー水による切削力向上の効果により、全体で 44% (8.87/15.89=0.56)

の排泥削減効果が得られた。

6. おわりに

本研究では、高圧噴射攪拌工法の建設汚泥の減量化を目的として、高吸水性ポリマー水に着目した室内試験ならびにフィールド実証試験を実施した。その結果、本工法は高吸水性ポリマー水の拡散抑制効果による切削能力向上と吸水排出特性により、施工時の排泥排出を阻害することなく改良体品質を高めるとともに、地盤への投入総量 (水、固化材スラリー) を減らし建設汚泥の減量化を実現できる技術であることが実証された。今後、国土強靱化を背景に基礎地盤強化の需要は益々増加するものと考えられ、低炭素化が求められる建設分野の CO₂ 発生抑制に寄与できる環境負荷低減型の地盤改良技術として、現場展開を図っていく所存である。

JCMA

《参考文献》

- 1) 利根誠他：高吸水性ポリマーを用いた高圧噴射攪拌工法の開発 - 地盤切削力の向上による排泥減量化 -, 地盤工学ジャーナル, Vol.18, No.3, pp.267-283, 2023
- 2) 浅野均他：高吸水性ポリマー材を利用した地盤掘削安定液の基本性状と場所打ち杭工法への適用, 土木学会論文集 F1, Vol.73, No.2, 71-87, 2017
- 3) 八尋暉夫：最新ウォータージェット工法, 鹿島出版会, 1996.
- 4) 吉田宏：ウォータージェットの流動特性とその切削性能の高度化に関する研究, 大阪大学大学院博士論文, 2011.

【筆者紹介】



下坂 賢二 (しもさか けんじ)
戸田建設㈱
技術研究所 社会基盤構築部
課長



利根 誠 (とね まこと)
戸田建設㈱
土木技術統轄部 土木技術部
次長



大野 康年 (おおの やすとし)
太洋基礎工業㈱
技術本部
技術部長