

総説

高圧噴射攪拌工法の技術動向

赤木 寛一*

1 まえがき

筆者と高圧噴射攪拌工法との縁が生まれたのは、20年ほど前にジェットグラウト協会が始められたジェットグラウト技士検定試験の試験委員会に参加させていただいたことであった。当時の試験委員会は、当時東海大学におられた八尋暉夫先生、鉄道総研の村田修さん、そして筆者で構成されていた。

八尋先生のお話や試験問題を通して、筆者自身はそれまであまり縁のなかったジェットグラウト工法の技術開発の歴史、理論的背景、技術的特徴、優位性などに触れて目を開かれる思いであった。その後も、鹿島建設、ケミカルグラウトにおられた吉田宏さんから、1973年にモスクワで開催された第8回国際土質基礎工学会議における八尋先生の論文発表、技術展示などの苦労話を聞かせていただいた記憶がある。このように、このジェットグラウト工法は日本発の技術としてスタートして、世界各国の現場で応用展開されて技術進歩を遂げてきた技術であるといえる。

近年、我々建設技術者の開発目標において、「環境問題」は欠かせないキーワードとなっている。これは、建設業界に対する環境問題に対する地球規模の要請の存在が背景にある。

1.1 国際的な要請

環境問題に関する国際的な流れと日本の関わりを簡単にピックアップすると次のようになる。

- ・1992年 国連環境開発会議（地球サミット）開催
- ・1997年 COP3（京都会議）開催
- ・2001年 日本 環境省が発足（環境庁から昇格）
- ・2015年 国連 持続可能な開発目標（SDGs）を採択
- ・同年 COP21 パリ協定（-2℃長期目標）を発効
- ・2020年 日本政府「2050年までに温室効果ガスの排出量を実質ゼロ」を表明

1.2 建設業界の対応

建設業界の代表組織の日本建設業連合会（日建連）は、その環境自主計画（2021年）において、以下の3要素を掲げている。

- ・脱炭素社会（CO₂排出抑制など）
- ・循環型社会（建設副産物の再資源化など）
- ・自然共生社会（生物多様性の保全など）

これらの行動指針は、日本経済団体連合会（経団連）が2020年に表明した「2050年カーボンニュートラルに向けて」を受けたものであり、建設業全体として参画維持

していくものである。

以上に示されるように、地盤分野の技術開発において、環境問題の視点をもつことは不可欠となっている。

2 近年の技術動向

2.1 開発テーマと着眼技術

現在の高圧噴射攪拌工法の基礎となる「ジェットグラウト工法」が開発・実用化されたのは1971年である。その後、1975年には国内建築基礎の構造部位に「コラムジェット工法」が実適用され、1977年の国際土質工学会議では欧米からの注目を集めた。海外企業への技術供与は1970年代後半から行われ、グローバルに活躍する技術となった。それから50年経過した現時点（2021年末）における高圧噴射攪拌工法の技術動向を以下に整理する。

各工法に関するメーカーカタログ、報文、論文ならびにNETIS掲載内容（表-1参照）などを調査したところ、開発のテーマは概ね、①排泥量の低減、②出来高品質確保、③近接影響の低減、④施工の高速化、⑤適用の拡大、に大別されるようである。環境問題や環境保全に直接的に寄与するテーマは①、②、③であるが、そのほかに工

表-1 NETIS¹⁾登録技術の一覧表

技術名称	登録番号	摘要
ジェットクリート工法	KT-170003-A	
Megaジェット工法	KTK-160023-A	
LDis-Dy工法	KT-200141-A	
NJP工法シリーズ	KT-160120-A	
SMM-Low工法	QS-210021-A	
FTJ-FAN工法	HR-140015-A	
SMM-Dy工法	KT-200140-A	
SJMM-Dy工法	KT-200150-A	
N-Jet工法	KT-200039-A	
RTP工法(OPTタイプ・JEP-Gタイプ)	KTK-210003-A	
ICT-JET	KT-180123-A	
JEP-G工法	KTK-210003-A	
スーパージェット工法	KK-980026	掲載期間満了
JEP工法	SK-100012	〃
PJG工法	KK-120046	〃
OPTジェット工法	KTK-100011	〃
X-Jet (クロスジェット) 工法	KT-990495	〃
PJG-Twins工法	KK-150029	〃
マルチジェット工法	KT-140048	〃
エフツインジェット工法	QS-040034	〃

順不同2021年12月現在

*AKAGI Hirokazu 早稲田大学 理工学術院 教授 | 東京都新宿区大久保 3-4-1-58-205

表-2 開発テーマと着眼点 (過去~2021年)

開発テーマ 手法の着眼点		① 排泥量の低減	② 出来形品質確保	③ 近接影響の低減	④ 施工の高速化	⑤ 適用の拡大	(参考) 標準的工法
1	ジェット 気液相流	—	—	二相, 三相	二相, 三相	二相, 三相	一相: 固化材 二相: 固化材, 空気 三相: 固化材, 切削水, 空気
2	切削水の 噴射手法	—	—	二孔(傾斜)噴射の 交差による切削範囲 の精度向上	—	—	一孔(水平)
3	固化材の 噴射手法	—	—	—	二孔噴射(水平) による高速化	二孔噴射(水平)に よる大径化	一孔
4	噴射の揺動	—	ノズル揺動位置 の把握	扇形の組合わせによ る必要形状の造成	—	扇形・壁状の造成	円形
5	切削材の選定	ポリマー水溶液 アプレイシブジェット	—	—	切削力向上	切削力向上	水道水
6	施工時 内圧管理	—	地盤内圧の計測	—	—	バックエア吐出と排 泥の管内輸送による 斜方向の改良体造成	ガイドホールとロッドの空隙 を経路とするエアリフト排泥
7	出来形・品質 (可視化)	—	施工時の 地盤内圧計測	施工時の 地盤内圧計測	—	—	—

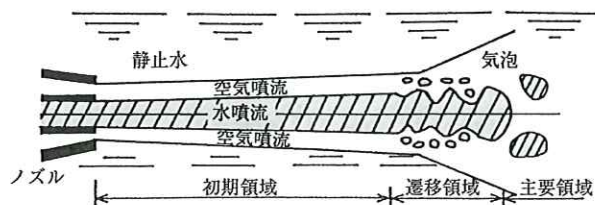


図-1 気液二相流の概念図²⁾

程短縮, コスト縮減といった従来からのテーマ④, ⑤も関心が高い。

これらのテーマを具現化する手法として, 噴射モーターの改良, ジェット噴流の効率化, 地中内圧(液圧)の計測, 切削材の選定などが行われている。これらの代表的な着眼点を7点抽出し, 開発テーマ(5項目)との関連性を示したものが表-2である。

2.2 技術動向

表-2の縦軸に示す7点について以下に説明を加える。

2.2.1 ジェット気液相流

高圧噴射攪拌工法は, ウォータージェット技術を用いて, スラリー状の固化材, 切削水, 圧縮空気をモニター(ロッドに接続された噴射ノズルを内蔵する装置)から高圧で噴射する工法であるが, この圧縮空気の目的は, 噴射流体(水, スラリー状固化材)の周りに気層を被覆させることで気液境界面を形成し, ジェット噴流の距離減衰を抑制することにある。この技術は, 1970年後半~1980年前半に日本で確立し, 現在の高圧噴射攪拌工法の核となるものである。

気液相流を発生させるには, ロッドならびにモニターの内部に, 液体(固化材スラリー, 水)と別系統で気体(空気)を同伴噴射させるルートと装置が必要となる。一般に三重管と呼ばれる噴射の組合わせは以下のとおりである。

上段噴射: 水, 空気

下段噴射: 固化材スラリー

あるいは固化材スラリー, 空気

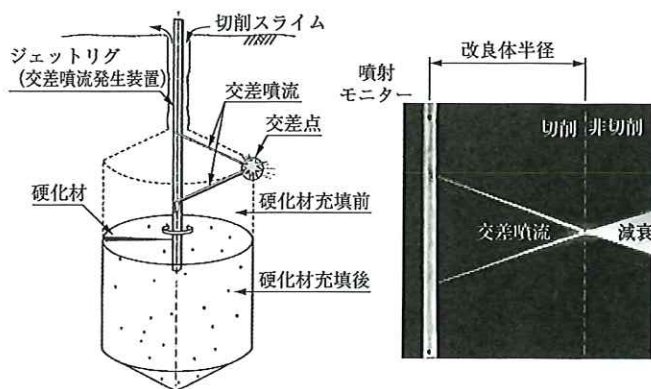


図-2 水噴流の交差による切削領域の管理³⁾

各々の噴射圧力は工法によって異なるが, 概ね水噴射は30~40MPa, 固化材スラリー噴射は2~40MPaの範囲にある。空気は0.7~1.2MPa程度である。

気液二相流のイメージを図-1に示す。

2.2.2 切削水噴射手法

一般的な工法では, 切削水は水平方向に噴射される。一方, クロスジェットと呼ばれる工法は, 傾斜噴射した2本の水噴流を意図した改良体半径の位置で交差させ, その衝突減衰を利用することで, 以遠の地山切削しないようにするコントロールを可能としたものである(図-2)。いわば, 原位置での固化材置換に対する正確な型枠の役目を果たすという新しい発想である。その交差技術を正確にコントロールすることにより, 近接影響を低減することができる。

2.2.3 固化材の噴射手法

高圧噴射攪拌工法の開発当初は, 噴流孔を一孔とし, モニターの回転によってロッドまわり全周を切削する手法が一般的であった。近年は, 大口径化や施工の高速化を図る目的で, 噴流孔を二孔設け, 対向二噴射の機構を持つ工法が増えてきた。例えば, スーパージェット工法, V-JET工法, Megaジェット工法などがこれに該当する。対向段差水平二噴流の状況を写真-1に示す。

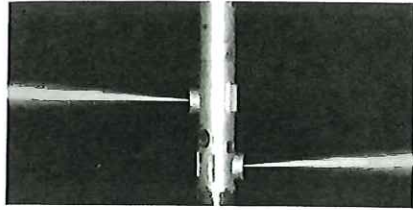


写真-1 対向水平二噴流（段差あり）の噴射状況⁴⁾

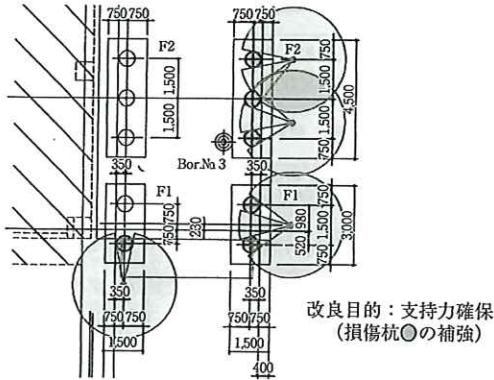
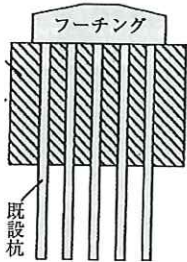


図-3 震災損傷杭の補強事例平面図（扇状部分改良）



引用：建築研究資料 建築基礎の被災度区分判定指針及び復旧技術例、建設省建築研究所、p59, 1997. 8.

図-4 震災損傷杭に対する高圧噴射攪拌工法による補強例⁵⁾

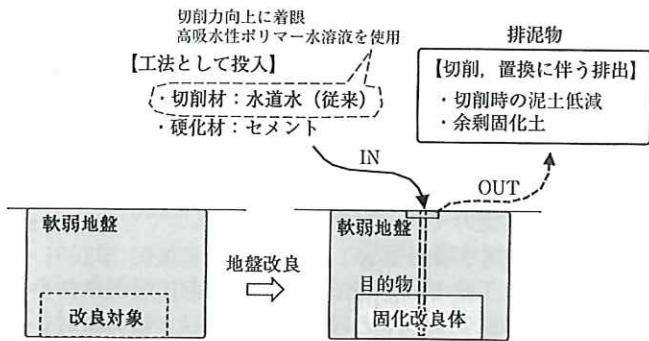


図-5 切削力向上と排泥量低減の概念

2.2.4 噴射の揺動

一般に地盤改良の目的として、「地盤支持力の確保」「掘削底面の安定（砂、粘土）」「壁状構造物の受働抵抗領域の強度向上」「すべり面抵抗力の向上」「液状化」などがあげられる。しかし、様々な地盤改良工法の中から高圧噴射攪拌工法が採用される理由の1つに、機械攪拌工法では対応できない既設構造物に密着した施工条件への適応性の高さがあげられる。例えば図-3は、震災で損傷した建築物の支持力を補うため、機能が低下した杭の周辺を高圧噴射改良工法で補強した事例である。本件は、建物が傾斜するほどの被災であったため、アンダーピニングによるジャッキ工法で傾斜を是正したうえで、損傷杭に対しては図-3に示すような地盤改良補強が行われた。

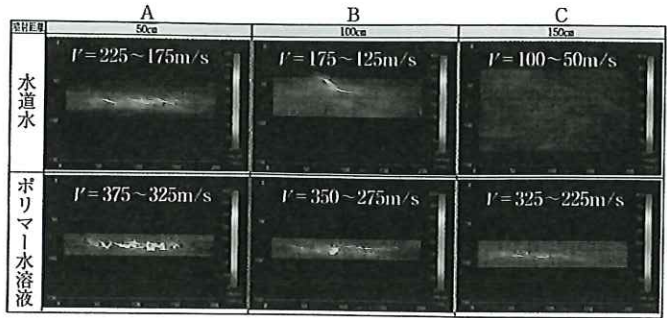


図-6 PIVによる流速分布図（脈動の影響あり）⁶⁾
(上段：水道水、下段：ポリマー水溶液)

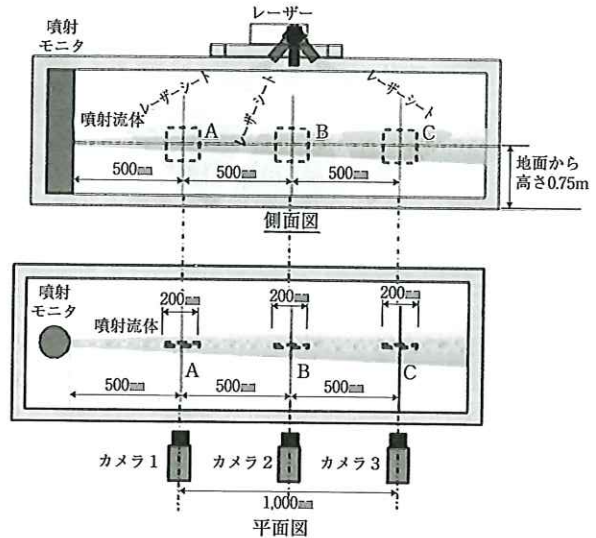


図-7 PIVによる測定概要⁶⁾

図-4は建設省建築研究所 研究資料に掲載された「高圧噴射攪拌工法を用いた基礎補修要領シート⁵⁾」の抜粋である。支持力機構代替としての応急的復旧を想定したものと考えられる。

2.2.5 切削材の選定

1) 高吸水性ポリマー水溶液の採用

金属などの精密加工分野では、ウォータージェット切削材に高吸水性ポリマー水溶液を使用すると、噴流体の気液界面の乱れが抑えられ、衝突時の壊食量を増加させる効果のあることが知られている。

この発想を高圧噴射攪拌工法に応用したものがハイブラストジェット工法である。同一水量当たりの切削力が向上すれば、投入する切削水量を低減できるため、排泥物（水、セメントスラリー、土の混合物）総量を減らすことが可能となる。切削力向上が排泥物低減に寄与するフローを図-5に示す。

高吸水性ポリマー水溶液の流速と距離減衰に関し、粒子画像流速測定法（PIV）で得られた流速分布図を図-6に示す。この結果から、測定流速範囲は、水道水が225～50m/sであるのに対して、ポリマー水溶液は375～225m/sであり、ポリマー添加による流速維持の効果を確認できる。

この実験で用いた粒子画像流速測定法（PIV）による測定の概要を図-7に示す。噴射モニターから噴流された流体に対してシート状のレーザーを照射して3台のカ

メラ（離隔500mm, 1,000mm, 1,500mm）で撮影し、画像処理を施した粒子の変位ベクトルから速度を算定するものである。

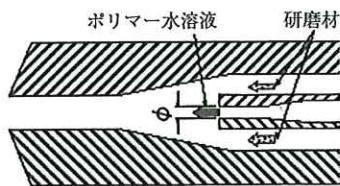


図-8 アブレイシブジェットノズルの構造概要⁶⁾

2) アブレイシブジェット

切削力向上効果の手段

として、研磨材（珪砂）を切削材に添加させて噴射させる技術がある。

噴射方法は、図-8に示すようなノズル構造の内部において水噴流の負圧に伴う研磨材の吸引・混合がなされ、同伴連行された状態で噴射される。

このハイプラストジェット工法では、対象地盤の硬軟に応じて、ポリマー水溶液に研磨材を添加する噴射手法も検討されている。図-9は、切削材3タイプ（水道水、ポリマー、ポリマー+研磨材）の噴射流体の挙動・形状を高速カメラで撮影したものである。ポリマー（CASE-2）、ポリマー+研磨材（CASE-3）は、CASE-1に比較して、噴射流体の距離による拡散が小さいことが分かる。拡散が小さいことは流速が大きい（図-6と関連）ことにつながり、地盤切削力向上に寄与する。

2.2.6 施工時内圧管理

高圧噴射攪拌工法は、地盤切削とセメントスラリー原位攪拌・置換という地盤固化の工程に加え、余剰排泥物を地上排出させる重要な工程がある。これは、排泥物の地上排出が滞り地中に残留すると、地中内圧力が増加し、周辺構造物の押出しや隆起など周辺影響を与える恐れがあるため、施工時における極めて重要な施工管理である。

これに対して標準的な工法では、ガイドホールとロッドの空隙を経路（鉛直）とする、エアリフトによる排泥手法を採用している。ただし、改良体を斜め方向に造成するケースでは、斜めのガイドホールを排泥ルートとすることは孔壁崩壊につながる恐れが高いため、別の手法を考えなくてはならない。そこで、ロッド内部に排泥用の専用管を別途設ける手法が開発されている。同時に、閉塞防止として内圧センサーの設置、排泥促進バックエア吐出機構の内蔵、排泥管における吸引機能など、新たな試みがなされている。斜め・水平方向の改良体造成を可能としたMJS工法は、これらに類する技術を導入したものである。なお斜め施工に限らず、上述の排泥促進機構を備えた工法も開発されている。

2.2.7 出来形・品質管理（可視化）

地盤深層部に造成した改良体の形状・物性が規格値・設計値を満足していることの担保は、施工後実施の地上からの探針測量（目視）、コアサンプリングの破壊試験などによって行われている。これらは“点”の結果で、“面”的な対応については規定された調査頻度・範囲・箇所数でカバーしているのが実情である。

これに対して、近年は破壊試験のみに頼るのではなく、破壊試験を最小限に留めた非破壊調査技術が導入されている。手法としては、地中内に設けた調査孔と各種センサー（熱電対、加速度計、音響センサー、弾性波、電気

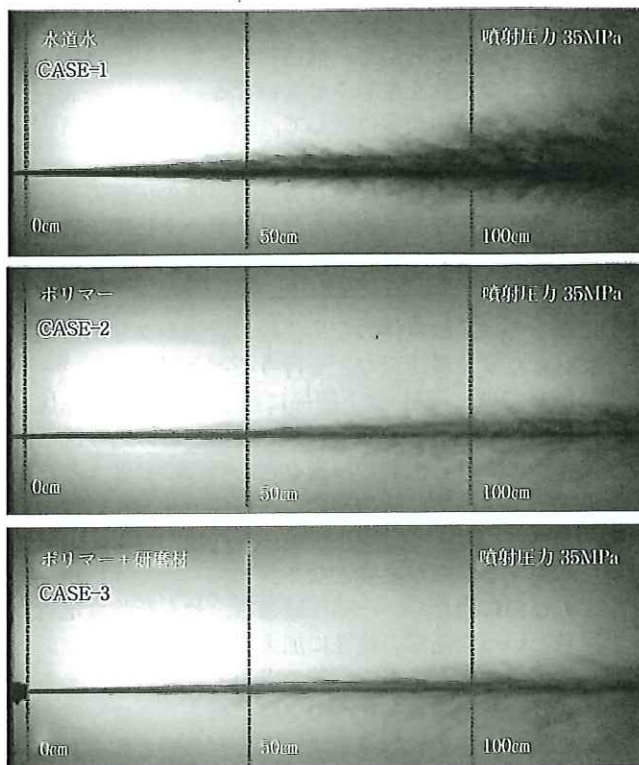


図-9 高速カメラによる噴射流体の挙動・形状⁶⁾

比抵抗など）により、施工段階に得られる情報から改良体の造成状況を判定するものである。それらを定量的に可視化する研究開発も進められている。本誌の各論でも一部紹介されているので参考とされたい。

2.2.8 その他（施工機の超小型化、省スペース化）

高圧噴射攪拌工法は、その施工機が機械攪拌工法に比べると格段に小さいため、空頭制限や狭隘空間といった厳しい施工条件への適応性に優れている。近年では省スペース化が一層加速し、線路下や施設構内のように、現地への施工機の運搬を重機に頼らず人力で可能な工法へのニーズが増えている。施工機の超小型化（重量・形状）が進められ、2mの空頭下でも施工可能な技術が開発されている。

2.3 建築構造物の基礎地盤への適用

2.3.1 設計への対応

建築構造物の基礎地盤へのセメント系改良の適用に当たっては、当該工法の施工管理や品質検査手法の確立はもとより、要求性能や照査項目に関する設計面での対応が必要となる。

そこで、準拠指針の一例として、「2018年版 建築物のための改良地盤の設計及び品質管理指針—セメント系固化材を用いた深層・浅層混合処理工法—」（監修：国土交通省国土技術政策総合研究所建築研究所）を参照して概説する。同指針は、前版（2002年）までは機械攪拌式を対象としていたが、2018年の改訂で高圧噴射攪拌工法を対象に加えている。

設計で用いる要求性能に関して、同指針（第2章 設計方針⁷⁾）では以下の3項目が示されている。

- ① 常時の荷重に対して、構造物に有害な影響を与えるような変形を生じさせないこと。
- ② 中地震動時の荷重に対して、過大に変形し構造物に有害な残留変形を生じさせないこと。
- ③ 大地震動時の荷重に対して、改良体の圧縮破壊あるいは周辺地盤を含めた改良地盤の全体的な破壊を生じ、構造物に転倒などを生じさせないこと。

①に関しては、改良体の変形係数の評価やクリープ特性を加味した変位量照査などを行うこととなる。

②に関しては、荷重-沈下関係に基づく改良体の降伏判定、偏心(地震動)による改良体の地山への押し込み沈下、改良体下面における滑動の照査などを行うこととなる。

③に関しては、終局時の挙動(改良体のせん断破壊、転倒・すべりに対する安定、改良体下端地山の支圧破壊など)に対する照査が必要となる。

以上の検討に当たり、一軸圧縮強さ、せん断強度定数、変形係数といった通常の物性に加えて、動的変形特性、液化化強度特性などを室内試験で求めておく必要がある。特に本設構造体(半永久)への適用に当たっては、性能規定への対応や限界状態設計法の導入が必要となるため、以下のような特性を把握しておくことが重要である。

- ①改良地盤の応力~ひずみ関係と要求性能に応じたひずみレベルの把握
- ②改良地盤の長期耐久性(長期材齢におけるCaイオンの溶出試験など)
- ③上部構造から伝達される水平力(中・大地震動)に対する改良体の保有水平耐力
- ④沈下量(弾性・圧密)算定における、改良体と原地盤(非改良部)を加味した地盤全体の等価剛性度

上記は、深層混合処理工法の全般に共通した課題であるが、高圧噴射攪拌工法は機械攪拌工法に比べると試験データが少ないため、本設への適用拡大に当たっては実証やデータ蓄積が必要になると考えられる。

2.3.2 配合管理

高圧噴射攪拌工法における現場発現強度の一例を図-10に示す。現場と室内配合の強度比は、地盤性状やセメント種別などで変わるため現場で個々に定めるものがあるが、この事例では砂質土で0.7以上、粘性土で0.5以上である。

2.3.3 施工管理

前に述べた「建築物のための改良地盤の設計及び品質管理指針」を参考に、求められる施工管理項目は以下に示すとおりである。

- ①施工位置および傾きの管理
- ②改良長の管理
- ③固化材の管理
- ④切削および攪拌混合度の管理
- ⑤支持地盤への着底管理
- ⑥補強対象構造物への密着性の管理

2.3.4 品質検査

改良体に対する品質検査の一例として、同指針に示されるフローを図-11に示す。このフローでは、コア採取

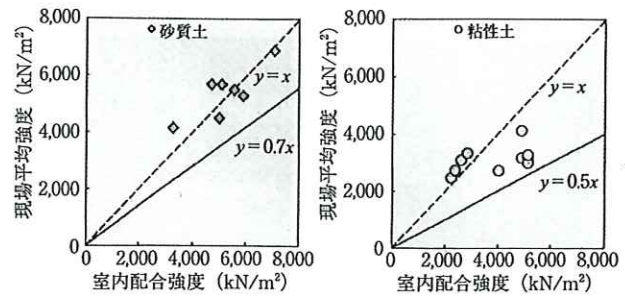


図-10 現場平均強度と室内配合強度の比⁸⁾

による改良体の連続性検査の手順が示されている。なお、これは機械攪拌式と同様、高圧噴射攪拌式にも適用できる。

具体的な数字をあげると、改良体全長に対するコア採取率の判定値は、粘性土で90%以上、砂質土で95%以上、かつ1mあたりのコア採取率は各々5%減じた値以上が必要とされている。調査箇所数は、検査対象層(改良範囲の各土質)に対して、改良コラム100本に1カ所以上かつ1検査対象群ごとに1カ所以上である。

品質にばらつきのない施工を行うのが理想であるが、不均一材料である地盤を対象とした深層混合処理工法では、必ずしも現実的ではない。そのため、同指針ではばらつきを考慮した検査方法(計量規準型抜取検査)を用いることを基本としている。

品質のばらつきをある程度想定できる場合は手法A、想定できない場合は手法Bを採用することとされている。合格判定値を算定するための統計学的な処理方法の詳細は同指針を参照されたい。

3 今後の展望

本稿では、高圧噴射攪拌工法がその優位性を最大限発揮し、社会基盤構築に貢献していくことを念頭に、技術動向を探った。冒頭で触れたように、工法としての成熟と環境問題への対応は両輪で進める必要がある。また建築分野への適用拡大には、建築構造系の指針への適合性も不可欠であろう。

昨今の産業界のトレンドの1つに、少子高齢化に伴う担い手不足の解消策として、AIやICTの活用があげられている。その活用の内容は、単純作業の代替から自律的判断といった高次のレベルまであり、業種によって様々である。

では、高圧噴射攪拌工法への適用を考えた場合、どうであろうか? 排泥の詰まりに対する地盤内圧の変化や圧縮空気の圧力制御などに対しては、精度のよいビッグデータが集積されるならば実現可能性があるように思える。しかし、地盤の不均一性に起因する切削・注入材の弱層部へのリーク、周辺地盤の隆起、近接構造物の側方押し出しなど、トラブルの前兆としての事象をAIが察知して、自律的に回避するシステムが構築されるまでには、さらなる技術革新が必要であろう。

本稿の準備に当たっては、利根誠氏(戸田建設)にお手数をおかけした。記して謝意を表する。

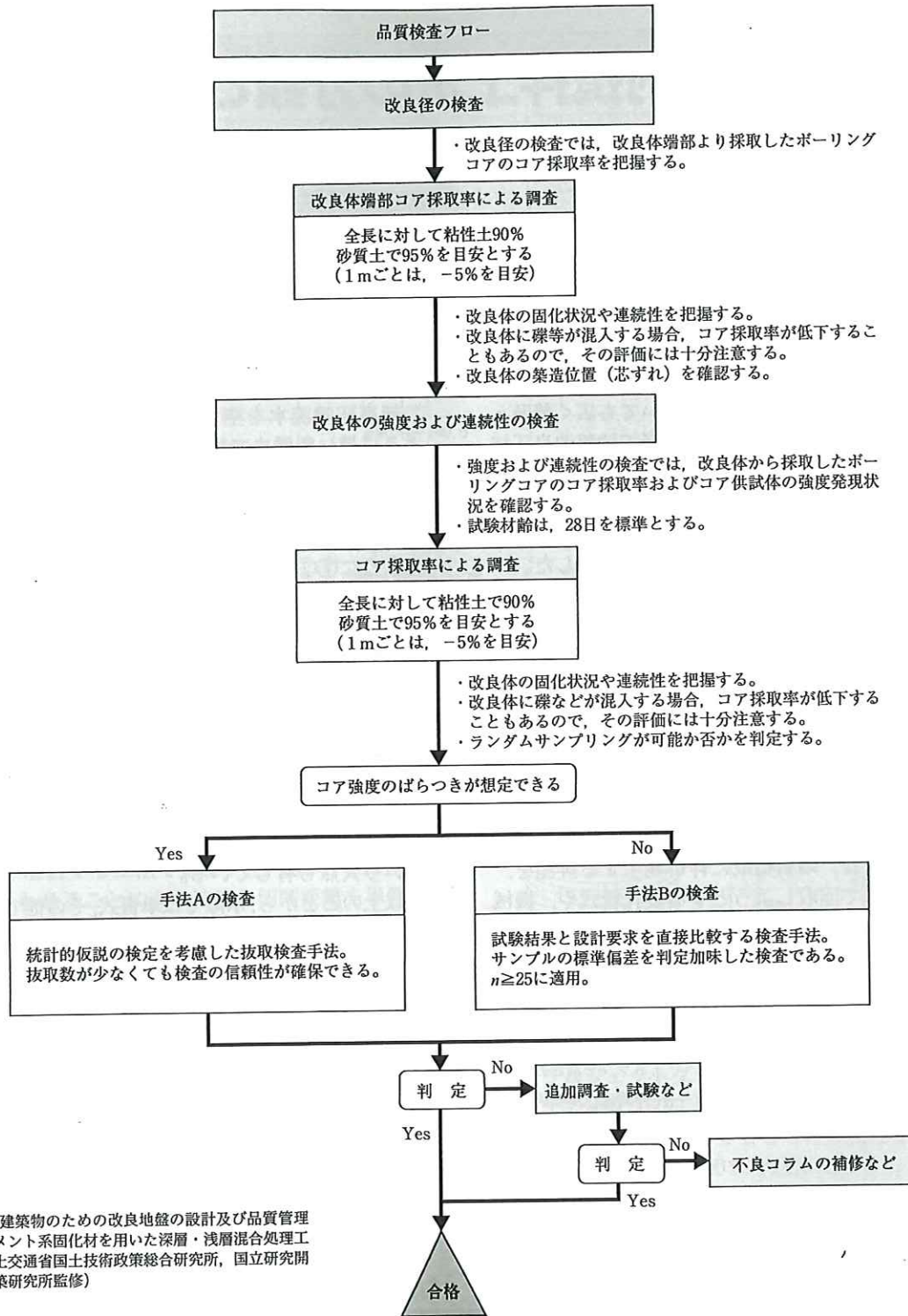


図-11 改良体の品質検査フロー⁹⁾

出典：2018年版 建築物のための改良地盤の設計及び品質管理指針—セメント系固化材を用いた深層・浅層混合処理工法—（国土交通省国土技術政策総合研究所，国立研究開発法人建築研究所監修）

参考文献

- 1) 国土交通省NETIS：https://www.netis.mlit.go.jp/netis/
- 2) 八尋暉夫，吉田宏，西謙二：ウォータージェットを利用した地下工法，鹿島出版会，pp. 53～129，1983.
- 3) クロスジェット協会：クロスジェット工法 技術資料(第22版)，2020. 10.
- 4) ライト工業(株)：Megaジェット工法 技術カタログ，2019. 3.
- 5) 建設省建築研究所：建築研究資料 建築基礎の被災度区分判定指針及び復旧技術例，p. 59，1997. 8.

- 6) 利根誠，下坂賢二，赤木寛一他：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—，地盤工学会 第14回地盤環境シンポジウム，2021.
- 7) 国土交通省国土技術政策総合研究所，国立研究開発法人建築研究所監修：2018年版 建築物のための改良地盤の設計及び品質管理指針—セメント系固化材を用いた深層・浅層混合処理工法—，p. 13およびp. 440，2018. 11.
- 8) 日本建築総合研究所：建築技術性能証明評価概要報告書（エコタイト-S工法），2015. 3.
- 9) 参考文献7)と同じ。