

第14回（平成27年度）技術報告会
北海道土木技術会 土質基礎研究委員会

土質基礎に関する「新しい地盤改良工法」
技術報告会

報 告 集

平成28年2月

主催 北海道土木技術会
土質基礎研究委員会

目 次

a-1 FTJ工法の紹介	1
秋間 健, 田邊重雄, 杉野秀一 (株)不動テトラ	
a-2 V-JET工法の概要・適用例と改良体出来形に関する考察	7
山崎淳一 (三信建設工業株)	
a-3 地中障害物層の介在する地盤に適合した複合相対攪拌工法の概要と施工事例	15
近藤省一, 西尾 経, 竹田敏彦, 松岡大介, 市川公彦 ((小野田ケミコ株)), 三浦正嗣 (福岡県企業局), 斎藤邦夫 (中央大学), 高倉功樹 (エポコラム協会)	
b-1 狹所での液状化対策を目的とするスマートコラム工法の開発	24
山田修三, 今井政之, 小西一生 (株)竹中土木	
b-2 既設構造物を対象とした締固めによる液状化対策技術	31
森鼻章治, 竹内秀克, 杉野秀一 (株)不動テトラ	
b-3 微生物による泥炭固化の可能性について	38
佐藤厚子 (寒地土木研究所), 川崎 了 (北海道大学) 畠 俊郎 (富山県立大学), 林 憲裕 (寒地土木研究所)	

図1 FTJ工法とV-JET工法の分類図

（三）食器の加工THU-Vとその他の機械による食器の加工
（四）食器の加工THU-Vとその他の機械による食器の加工

（五）食器の加工THU-Vとその他の機械による食器の加工
（六）食器の加工THU-Vとその他の機械による食器の加工

（七）食器の加工THU-Vとその他の機械による食器の加工
（八）食器の加工THU-Vとその他の機械による食器の加工

（九）食器の加工THU-Vとその他の機械による食器の加工
（十）食器の加工THU-Vとその他の機械による食器の加工

（十一）食器の加工THU-Vとその他の機械による食器の加工
（十二）食器の加工THU-Vとその他の機械による食器の加工

（十三）食器の加工THU-Vとその他の機械による食器の加工
（十四）食器の加工THU-Vとその他の機械による食器の加工

株式会社不動テトラ 地盤事業本部技術部 秋間 健^{※1}同上 田邊重雄^{※2}同上 杉野秀一^{※3}

1.はじめに

高圧噴射搅拌工法は、超高压のジェット噴流によって地盤を切削し、セメント系の材料（固化材）を用いて固化改良体を造成する地盤改良工法である。「FTJ（エフツインジェット）工法」は、高圧噴射搅拌工法の一種であり搅拌翼の両側に取りつけた噴射ノズルから、固化材スラリーを高圧で噴射し改良体を造成する工法である。「FTJ（エフツインジェット）工法」では、2箇所のノズルから2流線で地盤を切削混合することで、従来技術よりも高速での施工と大きな径の改良体を造成することが可能となった。さらに近年では、既設構造物の耐震補強やリニューアル化の流れの中で、構造物の直下を施工する市場ニーズも拡大している。そのためには、従来の改良径（ $\phi 2000\text{mm}$ 程度）に比べて、さらに大きな切削距離が必要になるとともに、構造物直下を半円状、あるいは矩形状に必要な範囲を無駄なく施工する技術の開発が望まれてきている。こうしたニーズに対応するために従来の「FTJ（エフツインジェット）工法」の要素技術に揺動制御装置による噴射方向の制御を付加して、扇形あるいは矩形（長方形）断面の改良体を造成するために、「FTJ-FAN（エフティジエイファン）工法」を開発し、実用化に至っている。

本報告では、円形の改良体を造成できる「FTJ（エフツインジェット）工法（以下、本文ではFTJ工法とする。）」と扇形や矩形形状の改良体を造成できる「FTJ-FAN（エフティジエイファン）工法（以下、本文ではFTJ-FAN工法とする。）」について紹介する。図1にFTJ工法とFTJ-FAN工法の分類図を示す。

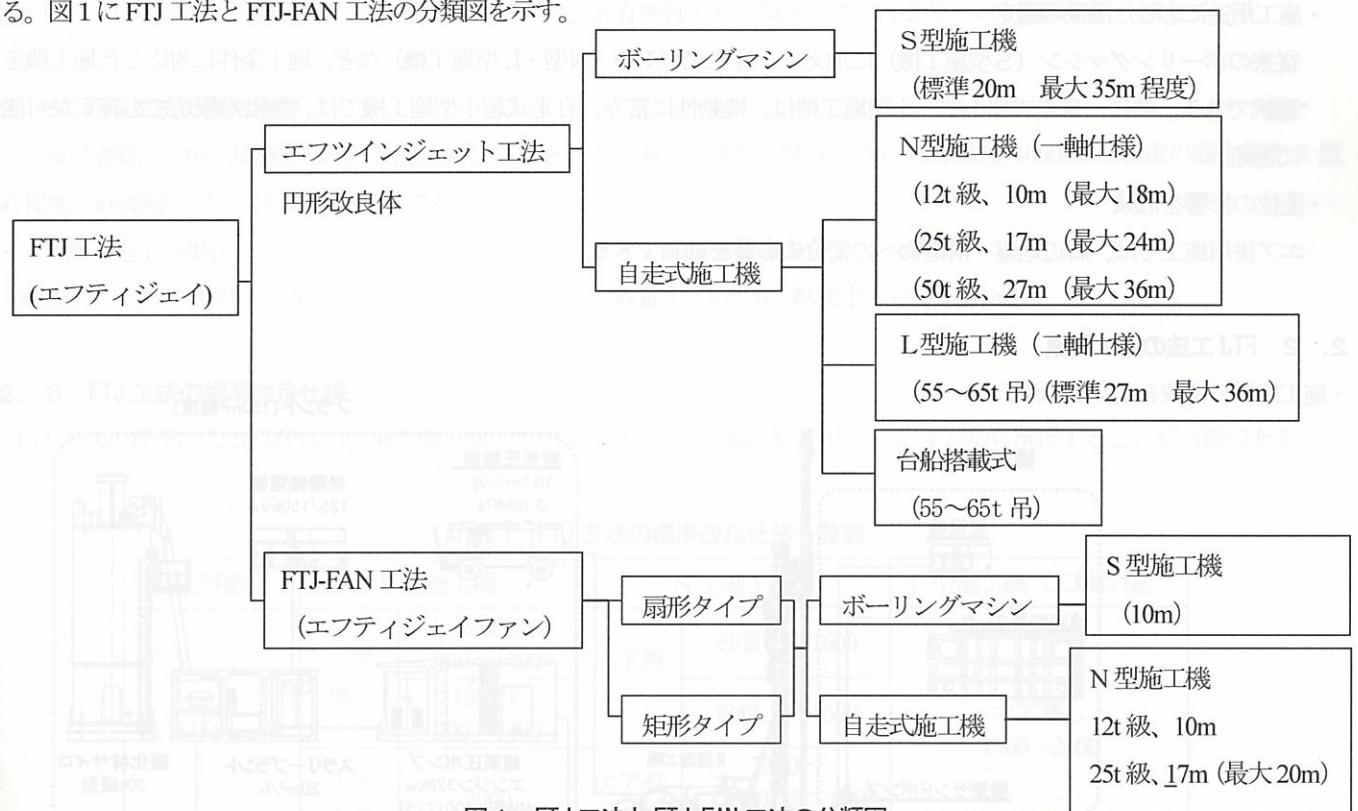


図1 FTJ工法とFTJ-FAN工法の分類図

※1 Takeshi Akima 東京都中央区日本橋小網町7-2

Tel:03-5644-8534 Fax:03-5644-8537.

※2 Shigeo Tanabe 東京都中央区日本橋小網町7-2

Tel:03-5644-8534 Fax:03-5644-8537.

※3 hidekazu sugino 北海道札幌市中央区北一条西7-3 (北一条大和田ビル) Tel:011-233-1640 Fax:011-233-1641.

2. FTJ工法の概要

FTJ工法は、地中で回転する搅拌翼の先端から2流線の超高压固化材スラリーを噴射し、対象地盤を切削しながら搅拌混合を行う高圧噴射搅拌工法である。

FTJ工法は、自走式施工機を使用した施工を標準とするが、従来の高圧噴射搅拌工法と同様に、ボーリングマシンでの施工も可能である。また、単管式(グラウト噴射)と二重管式(エア・グラウト噴射)を用途と目的に応じて使い分けることができる。

2. 1 FTJ工法の特徴

FTJ工法の特徴を以下に示す。

・大径・高速化施工

2流線で高圧噴射を行うことで、従来の高圧噴射工法より高速化施工が可能で、大口径の改良体が造成できる。

・確実な施工管理

改良体の造成を確実に行うため、自走式施工機では深度と噴射流量をシステム管理装置にて管理できる。

・幅広い用途と目的

既設構造物と地盤改良体との間詰めや、密着施工、またエアを使用して施工する場合には止水目的の底盤改良、エアを使用しない場合は水中での施工も可能であり幅広い用途に適用できる。

・幅広い適用地盤

緩い砂質地盤、軟弱な粘土地盤に適用できる。さらに、従来の高圧噴射搅拌工法では、別途貫入補助を必要としていた礫等の介在する地中障害物やN値が50を超える硬質層も、特殊施工により貫入させて施工することができる。

・施工用途に応じた機械の選定

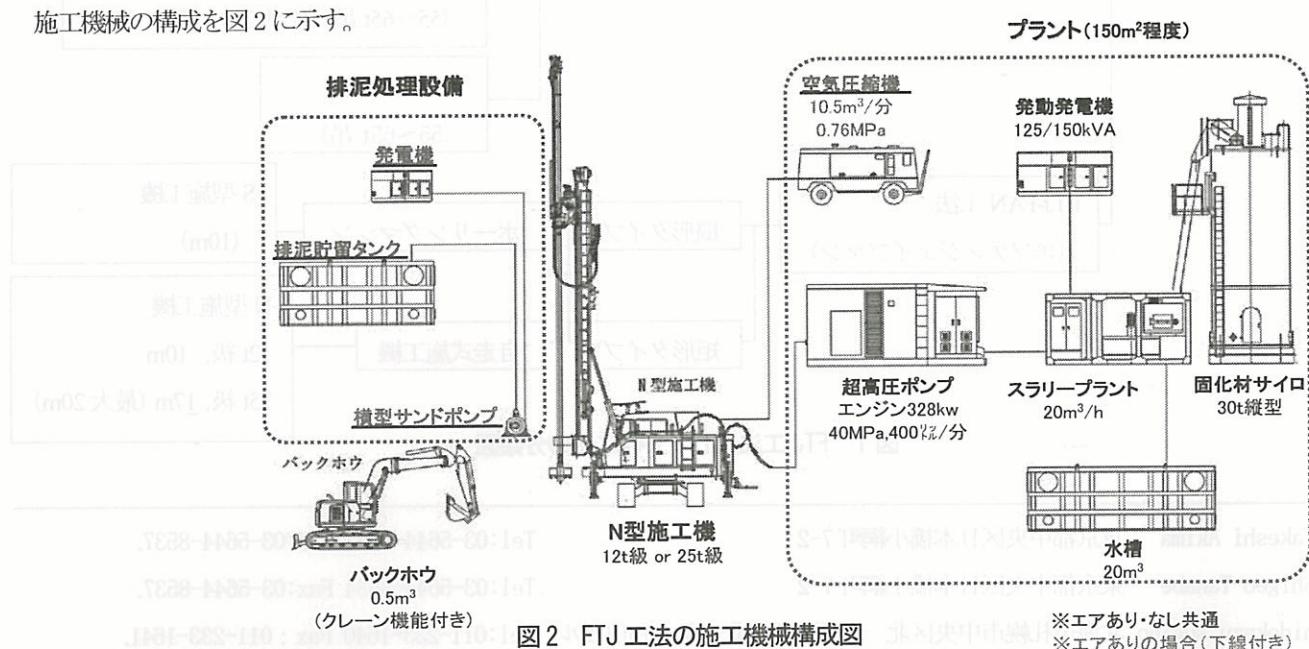
従来のボーリングマシン(S型施工機)に加えて、自走式施工機(N型・L型施工機)など、施工条件に対応した施工機を選択できる。特に、自走式超小型・小型施工機は、機動性に富み、自走式超小型施工機では、狭隘な場所でも施工が可能である。

・変位の影響を低減

エア併用施工では、周辺地盤・構造物への変位の影響を抑制できる。

2. 2 FTJ工法の施工機械

施工機械の構成を図2に示す。



2. 3 FTJ工法の施工フロー

施工フローを図3に示す。

- ①位置決め
- ②貫入
- ③貫入完了
- ④セメントストラリー
- ⑤引抜・造成
- ⑥造成完了

噴射

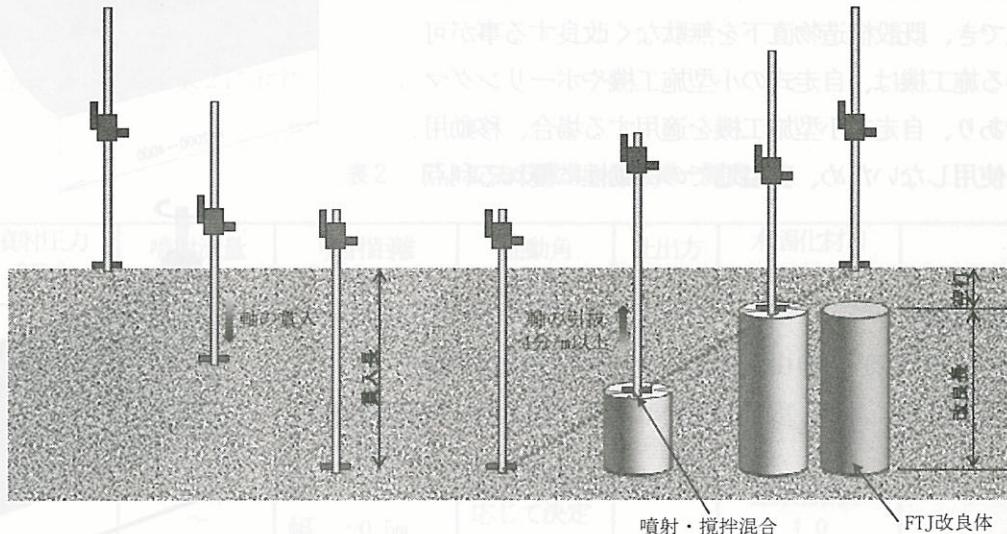


図3 FTJ工法の施工フロー

2. 4 FTJ工法の使用材料

使用材料は、FTJ工法専用に開発した専用固化材を使用して施工をおこなう。なお、専用固化材のラインナップとしては、一般土用の「FJ-1号」、六価クロム対応型の「FJ-1'号」、高有機質土対応型として「FJ-2号」の3種類を取り揃えている。

2. 5 FTJ工法の適用地盤

適用地盤は、施工機械の種別に関係なく以下のとおりである。また、厚さ2.0m、圧縮強度1000kN/m²程度の固化盤やN値50程度の砂礫層に対しても貫入が可能である。

・エア無し施工の場合

砂質土:N≤30 粘性土:N≤3

・エア有り施工の場合

砂質土:N≤20 粘性土:c≤50kN/m²

2. 6 FTJ工法の標準改良仕様

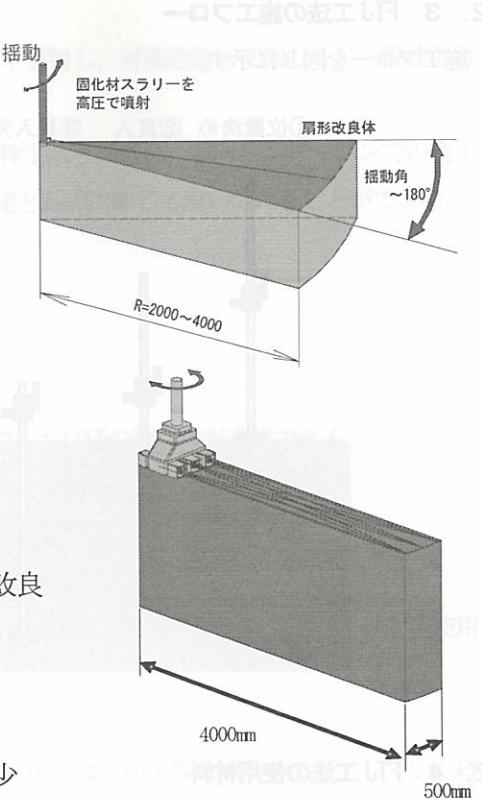
FTJ工法の標準的な改良仕様は、施工機・施工方法から表1に示す幅広いバリエーションから選択することが可能である。

表1 FTJ工法の標準改良仕様一覧表

機会種別	S型施工機		N型施工機		L型施工機(二軸仕様)
改良径(mm) ^{※1}	エア無し	砂質土 900~1200	エア無し	砂質土 1600	エア無し 1700~2400
		粘性土 900~1400		粘性土 1500	
	エア有り	2000	エア有り	2000~ (3500までの実績がある)	
搅拌翼(mm) ^{※2}	110		370 600		1200
吐出方式	引抜吐出		引抜吐出		引抜吐出
吐出圧力	30MPa以上		30MPa以上		30MPa以上
施工速度	4.0(分/m)以上		4.0(分/m)以上		4.0(分/m)以上

3. FTJ-FAN 工法の概要

FTJ-FAN 工法は、攪拌翼の正面にほぼ水平に取り付けた複数の噴射ノズルから高圧かつ大流量の固化材スラリーを揺動噴射させることで、図 4 に示すように任意の角度の扇形あるいは矩形（長方形）状の改良体の造成でき、既設構造物直下を無駄なく改良する事が可能となった。用いる施工機は、自走式の小型施工機やボーリングマシンが適用可能であり、自走式小型施工機を適用する場合、移動用の補助クレーンを使用しないため、狭隘地での機動性に優れる利点がある。



3. 1 FTJ-FAN 工法の特徴

- ・扇形あるいは矩形（長方形）の自由な形状の改良体の造成が可能。
揺動ジェット方式の採用により、扇形あるいは矩形（長方形）断面の改良体を造成できる。

- ・効率的な改良断面の配置が可能。
従来の高圧噴射攪拌工法（二重管工法）と比較して、改良体本数を減少でき、効率的な配置が可能である。

- ・周辺地盤・構造物への変位影響を小さくしての施工が可能。
エア併用施工（二重管）のため、周辺地盤・構造物への変位の影響を低減（抑制）することが可能である。
- ・施工条件に応じた最適な施工機の選択が可能である。
施工条件に応じてボーリングマシンタイプの S 型施工機【FTJ-FAN 工法（SA 工法）】と、機動性・施工能力に富んだ自走式超小型・小型施工機の N 型施工機【FTJ-FAN 工法（NA 工法）】から選択することができる。

3. 2 FTJ-FAN 工法の施工機械

施工機械は、2. 2 に示したエフツインジェット工法のエア有りの仕様に揺動装置を組み込んで施工をおこなう。なお、エフツインジェット工法と異なり施工仕様によっては、固化材スラリーの噴射量が大流量（最大で 600 リッター/分）になるために高圧ポンプや固化材サイロ等の台数を増加させる。

3. 3 FTJ-FAN 工法の施工フロー

FTJ-FAN 工法の施工フローは、図 3 に示した FTJ 工法と同じであるが固化材スラリーを二方向から吐出するのではなく一方向から吐出して施工をおこなう。

3. 4 使用材料

使用材料は、FTJ 工法と同じものを使用する。

供給管	出井管	出井管	出井管	吸込管
エア	エア	エア	エア	エア
固化材	固化材	固化材	固化材	固化材
土砂(m ³)0.0				

3. 5 FTJ-FAN 工法の適用地盤

FTJ-FAN 工法の適用地盤はFTJ 工法のエア有りの場合と同じである。
砂質地盤：N 値≤30 粘性土地盤：N 値≤3

3. 6 標準仕様

FTJ-FAN 工法の標準仕様を表2に示す。

表2 FTJ 工法の標準改良仕様一覧表

タイプ	噴射圧力 (MPa)	噴射流量 (リットル/分)	噴射距離 (mm)	振動角 (度) 注-1	吐出方 式	水固化材目	引抜時間 (分/m)
扇形	30以上	300 (標準) (150×2)	砂質土 R=3、500	~180	引抜 吐出	標準：1.5 止水目的： 1.0	4分/m以上 (振動角10°あたり)
			粘性土 R=3、000				4分/m (施工仕様に応じて決定)
矩形		~ 600 (最大) (300×2)	幅：0.5m 長さ：4.0m	施工仕様に応じて決定			

(注-1) 振動角は任意に設定が可能である。

(注-2) 引抜時間は土質条件・振動角度等の施工仕様による。

4. 適用事例

4. 1. FTJ 工法⁴⁾

FTJ 工法の適用事例として、掘削時の盤ぶくれ対策工事を紹介する。当工事は、鋼矢板による仮設土留め設置後に地盤を掘削し共同溝構築をおこなうために施工を実施した。

なお、当工事ではFTJ 工法で施工時に発生した排泥を乾燥・固化し、埋め戻し材として有効利用した。図5に当工事の適用事例を以下に示す。対象地盤は砂質土であり、改良長2.3mにφ1.6mのFTJ 改良体を改良率100%で施工をおこなった。

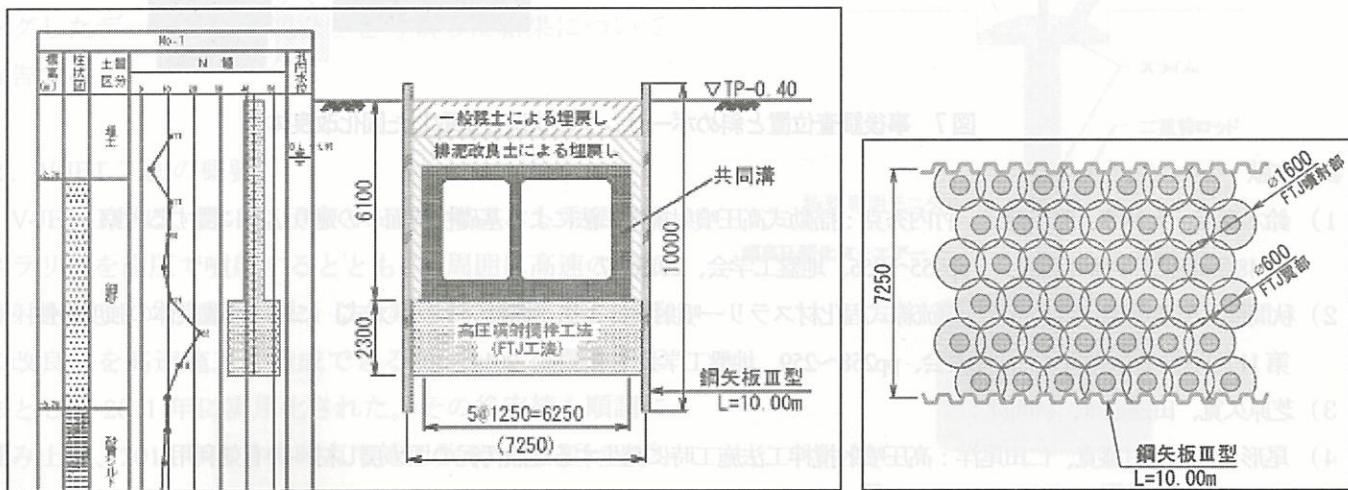


図5 FTJ 工法の適用事例

4. 2. FTJ-FAN 工法⁵⁾

既設構造物直下の FTJ-FAN 工法の適用事例として河川構造物直下の液状化対策による耐震対策を紹介する。当工事は特殊堤の直下を改良するために構造体を削孔することなく側面から固化材スラリーを噴射して施工が可能な FTJ-FAN 工法で施工を実施した。図 6 に標準改良配置図および断面図を示す。改良深度は地震時に「液状化する」範囲を網羅する深度、改良幅を決定し、FTJ-FAN 工法 (改良半径 R=4.0m, 揺動角 α=117°) および FTJ 工法 ($\phi 2.0\text{m}$) を組合せた改良体配置が決定された。地盤条件は、N 値=25 程度の砂質土が改良対象土であった。

FTJ-FAN 工法で造成された改良体の出来形および強度を、図 7 に示すように地盤改良体に対して斜めボーリングをおこない改良体の出来形確認をおこなった。図 7 には、採取した固化改良体の試料写真を示した。採取した固化改良体は、未改良部を挟むことなく連続した改良体が確認できた。また採取した試料の一軸圧縮試験を実施した結果、改良体の強度特性は設計基準強度を満足しており、強度の面からも良好な改良体の造成が確認できた。

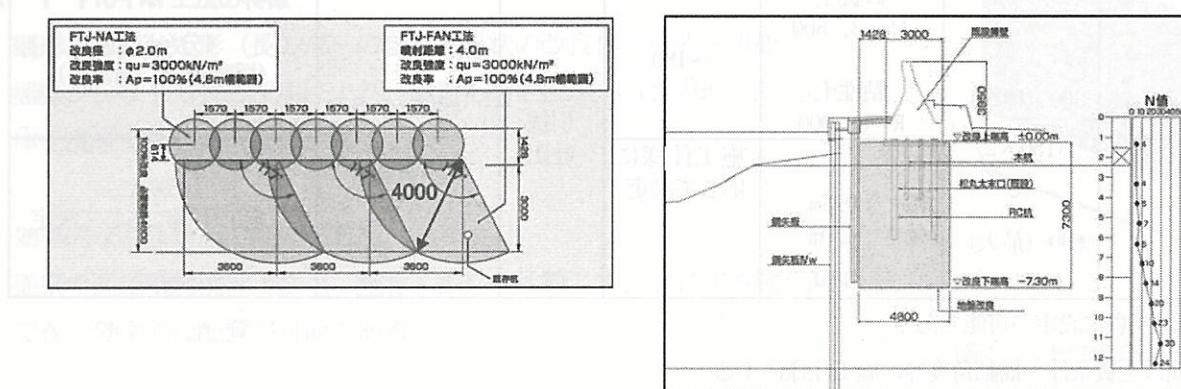


図 6 FTJ-FAN 工法の適用事例

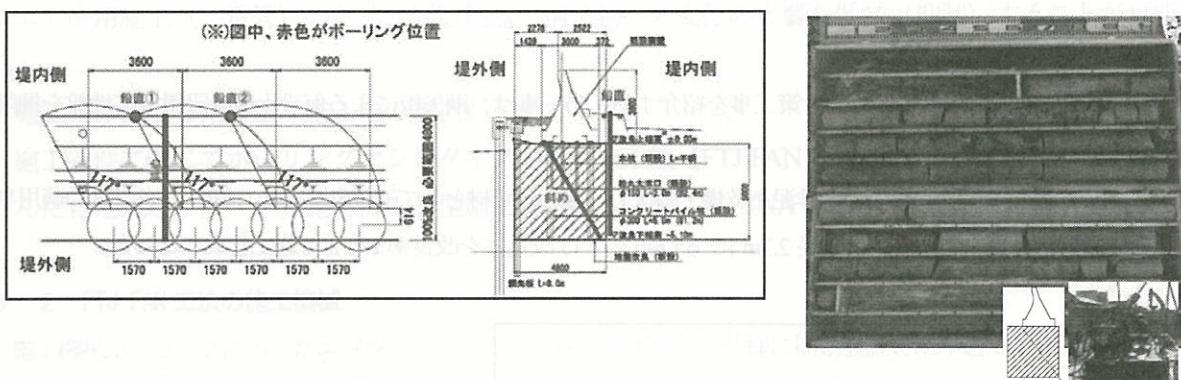


図 7 事後調査位置と斜めボーリングの状況と採取した固化改良体

参考文献

- 1) 鈴木亮彦、大林淳、原田健二、竹内秀克：揺動式高圧噴射搅拌工法による基礎杭背面への廻り込みに関する考察
第48回地盤工学研究発表会、pp955～956、地盤工学会、2013. 7.
- 2) 秋間健、田邊重雄、鈴木亮彦：複流線式固化材スラリー噴射搅拌工法（揺動ジェット方式）における改良体の強度特性
第11回地盤工学会関東支部発表会、pp258～259、地盤工学会関東支部、2014. 10.
- 3) 芝原久寛、田邊重雄、秋間健：
- 4) 尾形 太、北村盛寛、仁田尾洋：高圧噴射搅拌工法施工時に発生する建設汚泥の埋め戻し材への有効利用
第43回地盤工学研究発表会発表講演集、pp689～690、地盤工学会、2008. 7.
- 5) 伊藤竹史、高山英作、大竹洋、江川康夫：既設河川構造物の耐震化における揺動式高圧噴射搅拌工法の適用事例
第50回地盤工学研究発表会発表講演集、pp1881～1882、地盤工学会、2015. 9.

三信建設工業株式会社 山崎淳一

1. はじめに

ジェットグラウト工法は、セメント系硬化材などの高圧噴射によって地盤を切削・攪拌混合して地中に改良体を造成する地盤改良工法である。わが国において実用化されて以来、40 年以上の歴史を刻み発展し、現在では地盤改良の一翼を担う工法である。直径 10cm 程度の小さな径のボーリング孔から直径 2~5m の改良体を造成できることに加えて、幅広い地盤に対して適用できることや、一般的な地盤改良と比較して改良強度が高いことなど、多くの優れた特長を有している。一方で、改良体の出来形が地盤性状に加え、噴射流の優劣、噴射流量・圧力と切削速さや切削回数などの施工仕様の影響を受けやすく、実施工において常に均一径の改良体を造成することが難しいという特性を有している。このため、従来は、適用の際に設計上の補正や施工的な配慮がとられ、さらに試験施工による事前確認を実施した上で使用されることもある。

ジェットグラウト工法の開発においては、噴射流のエネルギーを最大限有効活用して、地盤の切削と硬化材との攪拌混合を効率的に行なうことが常に重要な課題となっている。また、改良体の出来形を的確に見極めて設計・施工を行うこと、地中の地盤切削状態をリアルタイムで把握して品質管理を効率的に行なうことが、これから開発課題であると考える。

これらの課題に対して、著者らは、高い噴射攪拌効率を発揮する先端噴射装置を開発し、基礎実験や実大の地盤噴射実験による検証を経て、大径の改良体を高速施工で造成できるジェットグラウト工法：V-JET 工法を実用化した。この技術により、従来技術による施工よりも経済性が向上し、環境負荷の低減を可能にしている。また、あらかじめ地盤中に設置した複数の管からジェットによる切削音を採取して分析する「地盤切削状態モニタリング技術：JWM System」を開発した。この結果、品質管理として深度方向に連続した改良体の出来形管理が可能になった。さらに、特殊仕様や特殊条件下での施工において、効率的に施工仕様を設定することが可能になった。

本稿では、V-JET 工法の概要と適用例について紹介すると共に、実大の地盤噴射実験における噴射仕様と改良体出来形の関係調査結果、JWM System によりモニタリングしたデータとの相関などを考察した結果について報告する。

2. V-JET 工法の概要

V-JET 工法は、図-1 に示すとおり、セメント系硬化材スラリーを高圧で噴射するとともに、周囲に高速の空気噴射を行う、「二重管工法」に分類される工法で、大径の改良体を高速施工で造成できるジェットグラウト工法として 2011 年に実用化された。その後実績を順調に積み上げ、2015 年 3 月末時点で施工数 97 件、延べ改良体積 115,000m³ の施工実績となっている（図-2）。

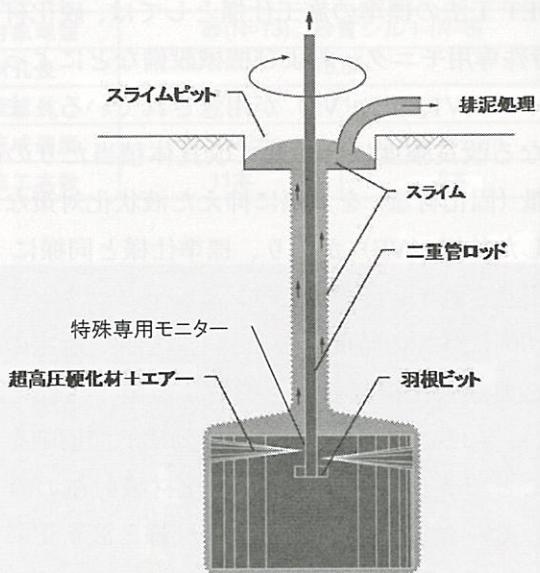


図-1 V-JET 工法の概要

V-JET工法の施工システムは、スラリープラントから高圧ホースおよび二重管ロッドを介して圧送される硬化材スラリーと圧縮空気を、地盤中の先端噴射装置（特殊専用モニター）によりエアに包まれた噴射流として水平方向に噴射する機構となっており、この特殊専用モニターを一定の速度で回転・引き上げることにより地中に円柱状の改良体を造成する。また、改良体造成用の二重管ロッドおよび特殊専用モニターを用いて、“削孔－先端部の流路切替え－改良体造成”を行う、直接削孔方式による施工が可能になっている。

ジェットグラウト工法では、地盤の切削と攪拌混合をいかに効率的に行うかが重要な課題である。特に、ポンプで加圧された流体のエネルギーを噴出孔まで損失させることなく、できるだけ円滑に地盤内に噴射することが必要となる。そこで、V-JET工法は、噴射流のエネルギーを最大限有効活用できる特殊専用モニターを開発することにより、大径の改良体を高速で施工することを可能にした。また、高速施工により、硬化材の使用量が少なくなることに加え、施工時に排出される排泥も減量化でき、環境への負荷を低減している。この特殊専用モニターは、噴射流の切削性能を左右する重要な機械装置であり、開発段階で試作品を用いた水中での噴射試験による性能確認を積み重ねることにより、完成させている。

V-JET工法の標準の施工仕様としては、硬化材の噴射量、特殊専用モニターおよび機械設備などによって3つのタイプ（V1、V2、V3）が用意されている。また、必要となる改良強度に合わせて改良体積当たりの硬化材噴射量（固化材量）を大幅に抑えた液状化対策などにより適した仕様（VE）があり、標準仕様と同様に3タイプが用意されている。従来のジェットグラウト工法では地盤切削に多くの時間を要し、その結果、所定の強度発現に必要な硬化材量以上を噴射する施工仕様となっていたが、V-JET工法では短時間で効率的な切削を可能にすることで改良目的に合った硬化材噴射量の設定を可能にしている。V-JET工法の標準仕様と液状化対策仕様の設計数値を表-1に示す。

V-JET工法は、タイプごとに標準の機械構成が異なるため、施工の規模や条件に合ったタイプを選択することにより効率的な施工が可能になる。たとえば、V1タイ



図-2 施工実績

表-1 V-JET工法の設計数値

標準仕様

タイプ	V1		V2		V3	
噴射圧力 (MPa)	35		35		35	
硬化材噴射量 (L/min)	180		360		540	
砂質土 $N \leq 50$	2.0	2.5	3.5	4.0	5.0	5.5
有効径 粘性土 $N \leq 3$						
砂質土 $50 < N \leq 100$	1.8	2.3	3.2	3.6	4.5	5.0
粘性土 $3 < N \leq 5$						
(m)						
砂質土 $100 < N \leq 150$	1.6	2.0	2.8	3.2	4.0	4.4
粘性土 $5 < N \leq 7$						
造成時間 (min/m)	7	11	10	14	14	18

液状化対策仕様

タイプ	VE1		VE2		VE3	
噴射圧力 (MPa)	35		35		35	
硬化材噴射量 (L/min)	180		360		540	
有効径 砂質土 $N \leq 10$	3.0		4.0		5.5	
粘性土 $N \leq 1$						
(m)						
砂質土 $10 < N \leq 30$	2.7		3.6		5.0	
粘性土 $1 < N \leq 2$						
造成時間 (min/m)	10		8		10	

※改良深度が30mを超える場合は、低減を考慮して有効径を設定する。

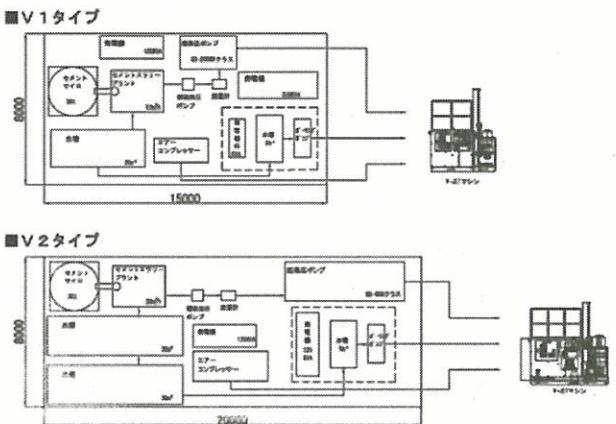


図-3 標準的な施工設備 (V1、V2)

は、よりコンパクトな設備での施工が可能であり、特に直接削孔方式と組み合わせることにより、狭隘な場所における施工の適用度が高くなる。図-3にV1、V2タイプの標準的な施工設備（プラント配置）を示す。

V-JET工法の特長を以下にまとめる。

- ①高い噴射効率を発揮する特殊専用モニターにより、大径の改良体を高速造成できる。
- ②3タイプの特殊専用モニターと噴射仕様の組合せにより、改良体造成径を幅広く設定することができる。
- ③削孔から造成までをひとつの施工機で連続的に行なう直接削孔方式により、コンパクトな設備による効率的な施工ができる。
- ④噴射攪拌効率向上により改良体積当たりの噴射量を少なくし、排泥発生量を低減することができる。
- ⑤改良体積当たりの固化材量を大幅に抑えた仕様により、効率的に地盤の液状化対策や強化を図れる。
- ⑥大径化、高速施工、排泥減量化で、従来の工法より優れた経済性を発揮する。

3. V-JET工法の適用例

(1) 空港施設の液状化対策における適用例

供用中の空港施設において、取付誘導路の液状化対策を目的として、既設の地下構造物に近接した範囲の地盤改良をV-JET工法により施工した。

図-4に示すとおり、地盤改良（液状化対策）の施工範囲は、GL-4.62m～GL-9.72mの砂層(N=4～13)とその下部GL-14.72mまでの砂質シルト層(N=2～5)である。また、地盤改良範囲の端部に近接した浅い地盤（盛土層）位置に供用中の幹線排水管が存在する。施工に伴う地盤変位などによる排水管への影響が少なく、大径と高速施工により効率的な施工が可能な工法としてV-JET工法が採用された。改良体の配置および施工方法を図-5に示す。改良体の配置計画において、施工に伴う地盤の不必要な緩みの発生を避けるため、排水管に最も近接する1列について削孔位置を改良範囲の端部として幹線排水管方向に噴射を行わない半円形の改良体を造成することを提案し、採用された。V-JET工法では、特殊専用モニターと二重管ロッドをピン接合とし、揺動運転が可能な地盤改良マシンを用いること、および特殊専用モニターの噴射口を1ヶ所とすることで、半円形や扇形の改良体の

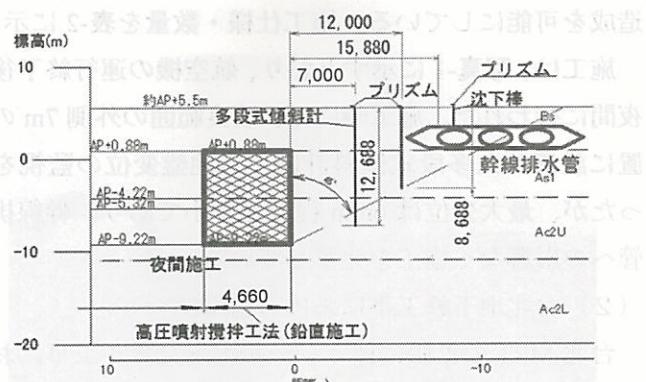


図-4 計画断面図（適用例1）

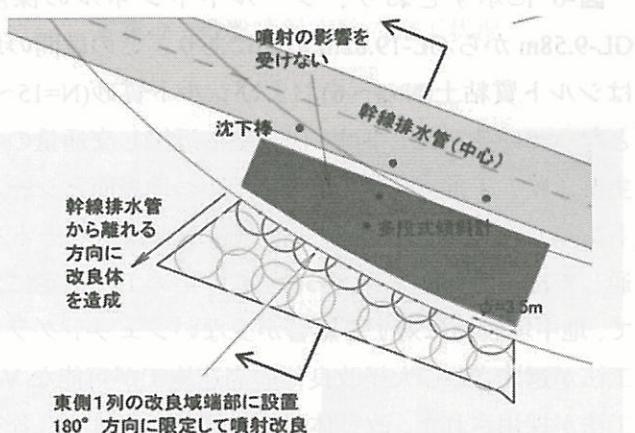


図-5 改良体配置図（適用例1）

表-2 施工仕様・数量（適用例1）

タイプ	V2	V2(揺動)
有効径	φ 3.5m	φ 3.5m(半円形)
対象地盤	砂(N=13)、砂質シルト(N=5)	
削孔長		15.6m
造成長		10.1m
造成速度	10, 14分/m	10, 14分/m
施工本数	11本	8本



写真-1 夜間施工の状況

造成を可能にしている。施工仕様・数量を表-2に示す。

施工は、写真-1に示すとおり、航空機の運行終了後の夜間に行われた。施工時には、改良範囲の外側7mの位置に設置した多段式傾斜計による地盤変位の監視を行ったが、最大変位は6mm程度と微小であり、幹線排水管への影響なく施工を完了している。

(2) 台北地下鉄工事における適用例

台北MRTの拡張に伴うシールドトンネル工事において、シールドマシン到達部防護を目的とした立坑背面の地盤改良を、V-JET工法により施工した。

図-6に示すとおり、シールドトンネルの深度はGL-9.58mからGL-19.82mの間にあり、この区間の地盤はシルト質粘土(N=3~6)およびシルト質砂(N=15~22)となっている。本工事は、住宅地に近接し交通量の多い主要道路の下部での施工であり、かつ地表面とシールドトンネルの間に存在する供用中の下水カルバートを貫通して施工する必要があった。このため工法選定において、地中埋設物に対する影響が少ないジェットグラウト工法が選定され、大径改良体の高速施工が可能なV-JET工法が採用された。改良体配置を図-7に示すが、 $\phi 3.5m$ の改良体38本のうち10本が下水用カルバートを貫通する施工であった。

下水カルバートの貫通箇所の施工概要を図-8に示す。地下水位がカルバート内部の底盤面より高く、下水は供用中であるため、事前に下水カルバート部を貫通するガイド管を設置し、地下水や排泥の流入を防ぐ止水ボックスを設置することで、下水の流れを遮断することなく施工を行った。なお、造成時にはガイド管まわりに堰を設け、排泥の流入に対する監視を行っている。

施工は、下水カルバートの機能低下や、隣接構造物へ影響を及ぼすことなく行われ、施工後のコアボーリングや原位置透水試験により所定の品質(圧縮強度、透水係数)が確保されていることが確認された。

4. 噴射仕様と改良体出来形の関係

ジェットグラウト工法の改良体の出来形は、地盤条件に加え噴射仕様に左右される。既往の研究によると、改良体の出来形すなわち高圧噴射による地盤切削距離Sは、噴流の噴射圧力P_m、ノズル径(噴射量)d₀、噴流の移動速度V_{tr}、繰返し回数(切削回数)N、および地盤

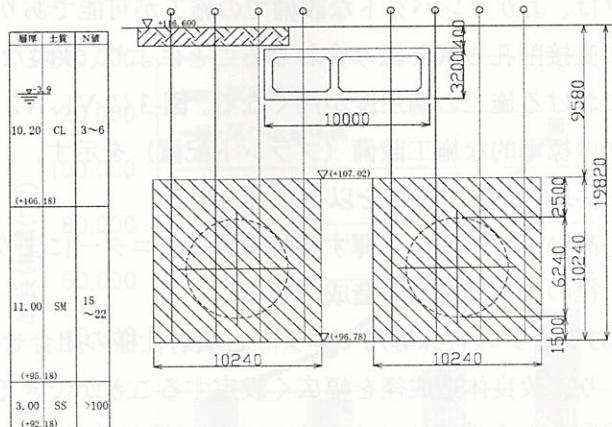


図-6 地盤改良断面図（適用例2）

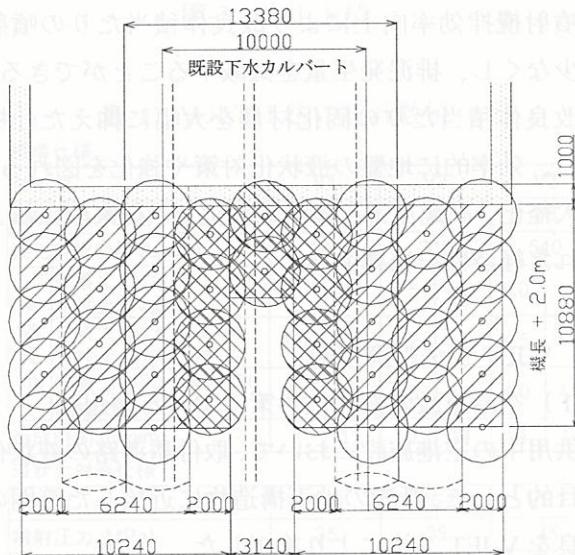


図-7 改良体配置図（適用例2）

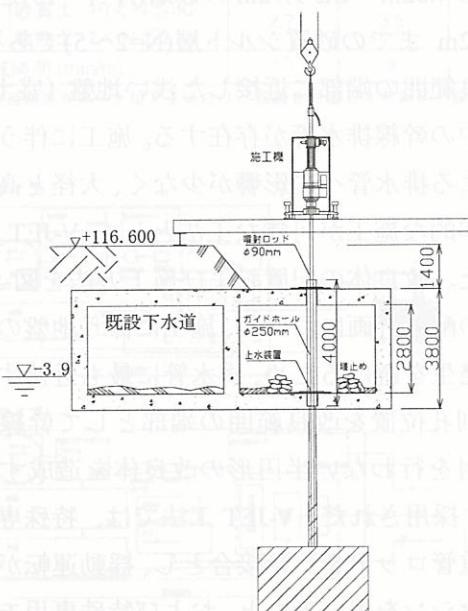


図-8 施工方法概要図（適用例2）

の強度 σ_c が影響を及ぼす因子となり、

$$S = f(P_m, d_0, V_{tr}, N, \sigma_c) \quad \text{式-1}$$

で表すことができるという研究成果が報告されている。

また、著者らの行った研究では、これらに加えてエア噴射量 Q_e との相関も大きいことが確認されている。ここでは、工法の開発段階に実施した実大の地盤噴射実験より得られた知見について報告する。

実大の地盤噴射実験は、N値 10 程度の細砂層および N値 30 程度の砂礫層を対象として、開発した工法の施工性の確認、設定した噴射仕様による造成における改良体の出来形と品質の確認を目的として 6 パターンの施工仕様で実施した。この 6 パターンの施工仕様における各因子の設定範囲は、以下のとおりである。

P_m	噴射圧力 (MPa)	$(35 \leq P_m < 40)$
d_0	ノズル径 (cm)	$(0.35 \leq d_0 < 0.45)$
Q_e	エア噴射量 (Nm^3/min)	$(5.0 \leq Q_e < 7.0)$
V_{tr}	移動速度 (cm/s)	$(95 \leq V_{tr} < 120)$
N	切削回数	$(1.5 \leq N < 3.5)$

実験の状況を写真-2 に、造成後に掘り出された改良体を写真-3 に示す。掘り出された改良体の調査において、その出来形を評価するため、深度ごとの地盤切削距離として改良体中心からの距離の計測を行った。なお、地盤噴射実験に先立ち、開発した特殊専用モニターの性能を評価するために図-9 の試験装置を用いて水中における水噴射試験を行っているが、この水噴射試験結果により、噴射圧力・ノズル径（噴射量）・エア噴射量と、ターゲットに作用する衝突荷重（噴射エネルギー）の減衰状況の相関を考察した。これらをもとに、地盤噴射実験における実際の地盤切削距離から対象地盤の切削に必要な衝突荷重を設定し、地盤切削距離と噴射圧力・ノズル径（噴射量）・エア噴射量の関係式を導いた。

実験と考察の結果から、得られた知見を以下にまとめた。なお、考察の詳細については、参考文献 4)、6) を参照されたい。

- 1) 水中における水噴射試験結果より、所定の衝突荷重を発揮できる距離 Y は、先端噴射装置を含む施工システムの影響を大きく受けるが、式-2 に示す噴射圧力・ノズル径（噴射量）・エア噴射量との関係式で表すことができる（図-10 参照）。

$$Y = f \cdot P_m^a \cdot d_0^b \cdot Q_e^c \quad \text{式-2}$$



写真-2 地盤噴射実験の施工状況

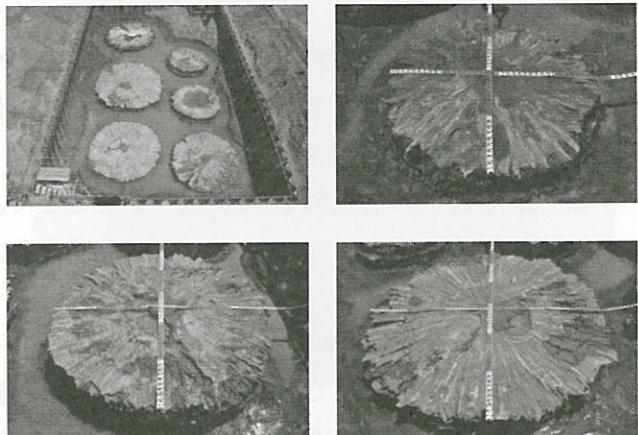


写真-3 掘出された改良体

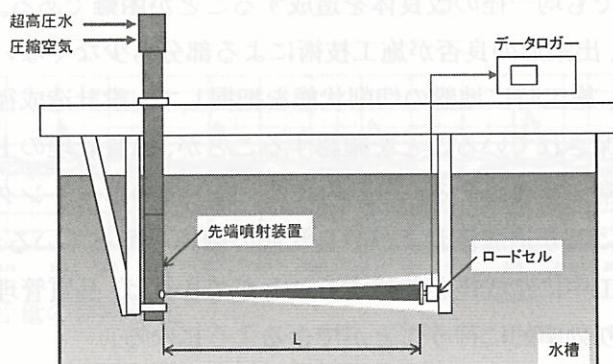


図-9 水中噴射試験装置

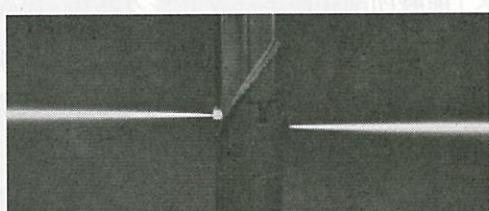


写真-4 特殊専用モニター (気中噴射状況)

- 2) 噴射流による切削の繰返し回数を増やすと地盤切削距離が大きくなるが、実大の地盤噴射実験では3回切削が2回切削に対して約10%の地盤切削距離増加であった。
- 3) 噴射流の移動速度が大きくなると地盤切削距離が小さくなると考えられるが、実大の地盤噴射実験で設定した範囲 ($V_{tr}=95\sim120\text{cm/s}$) では地盤切削距離への影響がほとんどなかった。
- 4) 上記の考察より、地盤切削距離 S は、式-3に示す各因子；噴流の噴射圧力 P_m 、ノズル径 d_0 、エア噴射量 Q_e 、噴流の移動速度 V_{tr} 、繰返し回数（切削回数） N の関係式表すことができる（図-11参照）。

$$S = f \cdot P_m^a \cdot d_0^b \cdot Q_e^c \cdot V_{tr}^d \cdot N^e \quad \text{式-3}$$

ただしこれらの知見は、開発した特殊専用モニター、対象地盤が $N=10\sim30$ の砂質土地盤、実大の地盤噴射実験で実施した各因子の設定範囲内という条件におけるものである。地盤強度の影響を考慮することに加え、データ数を増やして随時関係式を見直していくことで、さらに相関性を高めていくことが可能であると考える。

5. 改良体出来形確認技術の開発

ジェットグラウト工法では改良体の出来形が地盤性状に左右されるが、地盤の性状は特に深度方向で変化に富んでいるため、同一の噴射仕様により施工を行った場合でも均一径の改良体を造成することが困難である。また、出来形の良否が施工技術による部分も少なくないため、施工時に地盤の切削状態を把握して、設計造成径が確保されていることを確認することが、品質管理の上で非常に重要である。一般的には、施工後のボーリング調査により造成径および改良状態の確認を行っているが、施工中に造成径を確認することができれば、品質管理をより効率的に行うことができるようになる。

この課題に対して、あらかじめ改良範囲の地盤中に設置した複数の管からジェットによる切削音を採取して分析する「地盤切削状態モニタリング技術：JWM System」を開発した。これにより、施工中における改良体の出来形の把握が可能になった。JWM System の概要を図-12に、現場における計測状況を写真-5に示す。

システムは、地盤中の改良範囲に設置した複数の建込み管、建込み管内に挿入してジェットの切削音を採取す

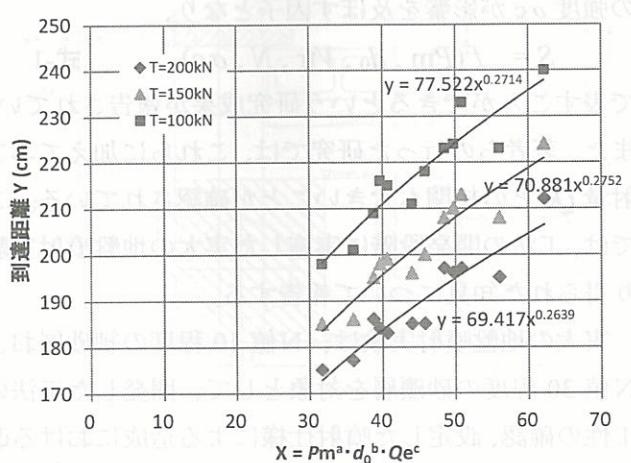


図-10 水噴射試験結果の相関

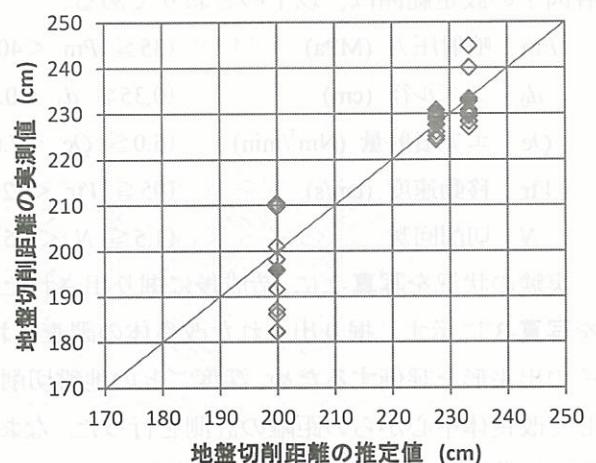


図-11 地盤切削距離推定値の相関

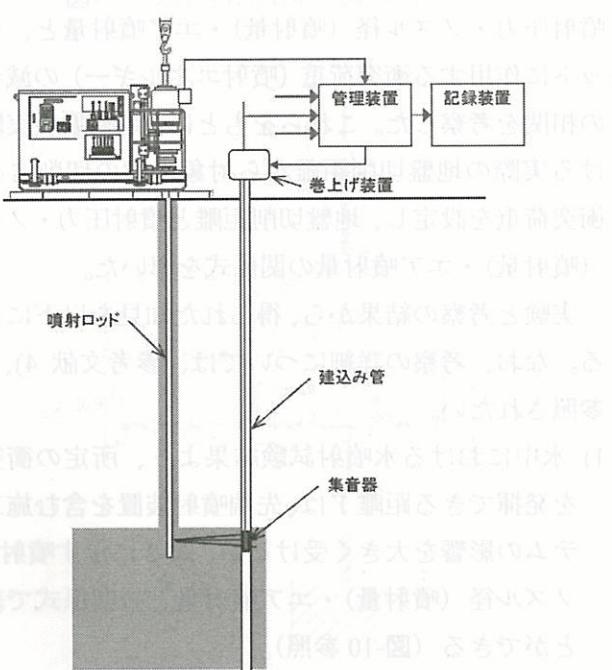


図-12 JWM System の概要

る集音器、ジェットの噴射ロッドの上昇に連動して集音器を上昇させる巻上げ装置、複数の集音器より採取された切削音データや施工深度を計測し表示する管理装置からなる。まず施工に先立ち改良体の造成範囲に複数の鋼管（建込み管）をボーリングにより設置する。建込み管の設置位置は、改良体中心からの離れを変化させた2～4パターンとする。計測時には、建込み管内に挿入した集音器により、噴射ロッドの回転に伴い一定の間隔で管に当たるジェット流を音の大きさとして計測し、これの経時変化を記録する。このデータを（時間一切削音の大きさ）の関係としてグラフ化し、表示される波形状から地盤切削状態を評価する。なお、管理装置のディスプレイには、リアルタイムでこの波形状が表示（写真-6）されるため、施工中における切削状態の把握が可能となっている。

先に述べた実大の地盤噴射実験において計測されたジェット流音量の経時変化の一部を図-13に示す。同図において、一定間隔で山形に音量が増加している箇所はジェット流が建込み管に強く当たったことを示しており、4ヶ所（中心から1.50m、1.75m、2.00m、2.25m）の計測の中で噴射ロッドに近い建込み管ほど明確な山形を示している。改良体掘出し時の確認状況は写真-7に示すとおりだが、深度ごとに計測した管位置から改良体端部までの距離（ Δx ）と波形状の評価結果の関係を考察した。波形状の線形の明確さ（大きさと形状）と振れ幅



写真-5 JWM System 計測状況

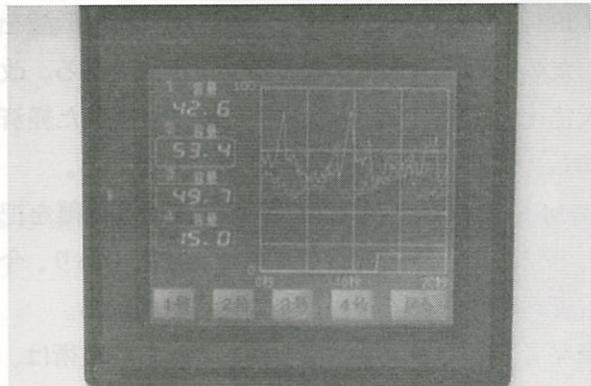


写真-6 管理装置のリアルタイム表示

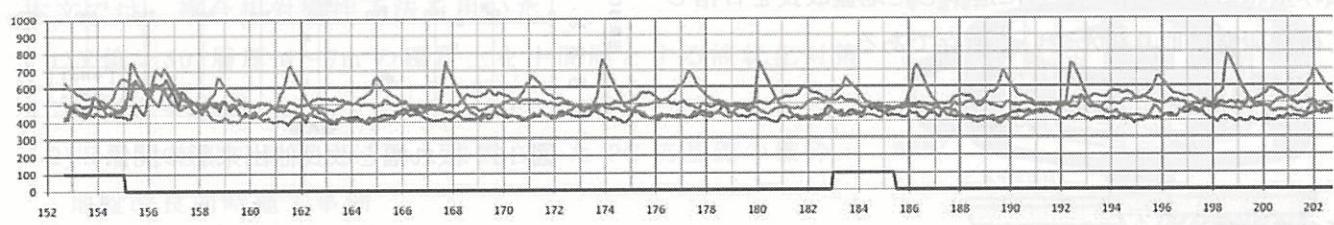


図-13 ジェット流音量の経時変化

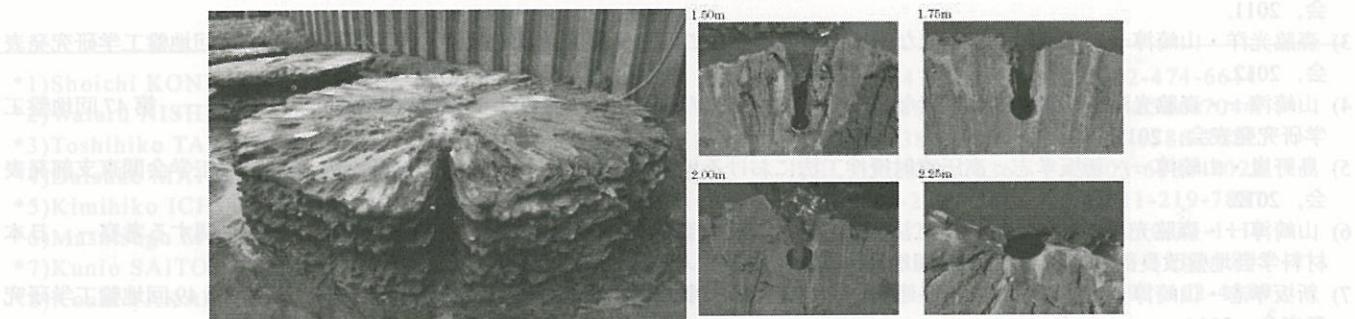


写真-7 改良体掘出し時の確認状況

(図-14)に着目し、これらと改良体出来形 (Δx) との関係は、図-15、図-16に示すとおりである。いずれも波形状の評価点と出来形に相関が認められ、図-15では評価点が3以上において、図-16では振れ幅が200を越えた時に、計測位置より大きい改良体が造成できている ($\Delta x > 0$) 傾向がみられている。

現在、JWM System は、試験施工時において施工仕様を決定したり設計の妥当性を確認するため、本施工初期における切削状態の確認のために利用されている。今後は、データの蓄積とともに、より的確な評価手法を確立し、施工時の品質管理に役立てていきたいと考えている。

6. おわりに

V-JET 工法は、施工の効率化と環境負荷の低減を可能にした“新しい”ジェットグラウト工法である。改良体の大径化、高速施工、排泥減量化により優れた経済性を発揮し、国内外において実績をのばしている。

JWM System は、ジェット流の到達する距離を把握することで改良体の出来形を確認する技術であり、今後の品質管理手法としての活用が期待されている。

開発者としての所見になるが、これらの技術は、研究開発の継続により、まだまだ伸び代のある技術である。機械器具の開発に併せて、基本原理の整理、集積したデータの解析などへの取組みが望まれる。

今後も、様々な設計仕様や施工条件に対応して実績を積み重ねるとともに、さらに進歩した地盤改良を目指して研究開発に取り組んでいく所存である。

深度	改良体の中心からの距離			
	1.50m	1.75m	2.00m	2.25m
4.5m	335	312	248	269
4.6m	342	316	257	294
4.7m	304	316	259	269
4.8m	339	414	278	228
4.9m	330	336	284	351
5.0m	320	266	213	284
5.1m	387	367	238	165
5.2m	368	304	247	222
5.3m	390	302	274	235
5.4m	406	273	225	288
5.5m	372	277	251	227
5.6m	406	262	166	248
5.7m	332	248	149	131
5.8m	361	250	126	104
5.9m	325	224	161	194
6.0m	290	220	88	130

図-14 音量レベルの振れ幅

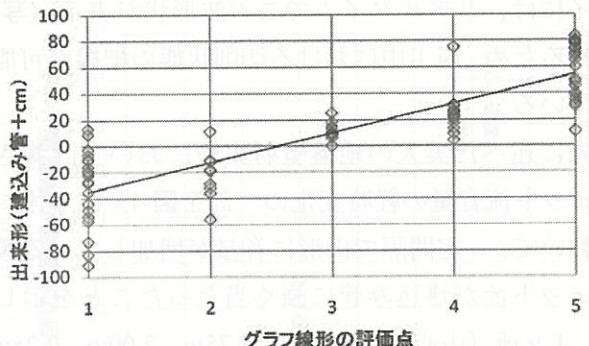


図-15 波形線形と改良体出来形の関係

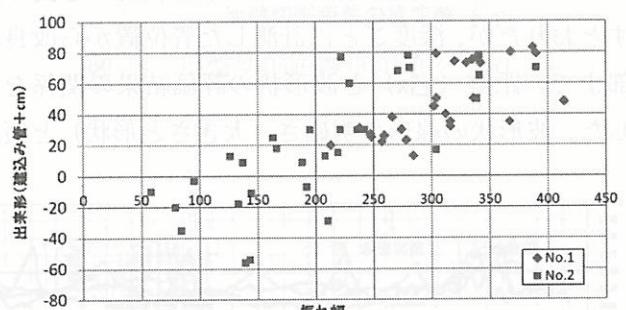


図-16 振れ幅と改良他出来形の関係

【参考文献】

- 八尋・吉田：最近の薬液注入工法③「コラムジェットパイル工法とその適用」，総合土木研究所，1978.
- 森脇光洋・山崎淳一・有馬暢：高圧噴射攪拌工法における地盤切削状態モニタリング技術の開発，第46回地盤工学研究発表会，2011.
- 森脇光洋・山崎淳一：高速施工が可能な高圧噴射攪拌工法の開発－実大実験の概要と施工結果－，第47回地盤工学研究発表会，2012.
- 山崎淳一・森脇光洋：高速施工が可能な高圧噴射攪拌工法の開発－噴射仕様と改良体出来形に関する考察－，第47回地盤工学研究発表会，2012.
- 島野嵐・山崎淳一・新坂孝志：高圧噴射攪拌工法における地盤切削状態モニタリング技術，第9回地盤工学会関東支部発表会，2012.
- 山崎淳一・森脇光洋：高圧噴射攪拌工法における先端噴射装置の性能および噴射仕様と改良体出来形に関する考察－，日本材料学会地盤改良部門委員会・第10回地盤改良シンポジウム，2012.
- 新坂孝志・山崎淳一・島野嵐・岩久保建志：台北地下鉄工事における大口径高圧噴射攪拌工法の実施，第49回地盤工学研究発表会，2014.

地中障害物層の介在する地盤に適合した複合相対攪拌工法の概要と施工事例

小野田ケミコ株式会社 近藤 省一^{*1)}, 西尾 経^{*2)}, 竹田 敏彦^{*3)},
松岡 大介^{*4)}, 市川 公彦^{*5)}
福岡県企業局 三浦 正嗣^{*6)}
中央大学 理工学部 斎藤 邦夫^{*7)}
エポコラム協会 高倉 功樹^{*8)}

1. はじめに

最近の機械式攪拌混合工法の分野では、多彩な施工システムが考案され、広く実用に供されている。これらの技術は施工実績と共に体系化され、目的に応じて使い分けられている。一般的に工法の適用性は、地盤の一様性を条件にして土性を砂質土あるいは粘性土に分類し、 N 値による区分と併せて明示されている。

しかしながら、現実の改良対象地盤は様々である。すなわち、

i. 地盤性状が大きく異なる土層が互層する場合

ii. 転石あるいはその他異物を含有する場合

iii. 改良範囲中に強固な中間層が介在する場合

等々、変則性に富む地盤が少なくない。また、既往の建造物跡地における地盤改良では、

iv. PC杭等の基礎杭が残置される場合

もある。

複合相対攪拌工法は外翼、中翼、芯翼の3つの攪拌翼を低速回転ながら相反回転させて強力なトルクを発揮する機構を有し、従来工法では地中障害物層として扱われてきた種々の改良困難地盤に対しても適用性が極めて高い。

本文では、複合相対攪拌工法を用いた

1) N 値 > 50 、層厚 6~7m の礫質土を中間層とする液状化対策の施工事例¹⁾

2) 旧浄化施設の建替えに伴う残置されたPC杭基礎の破碎・

地盤改良同時施工事例

の報告を通じて、当工法の有用性を検証する。

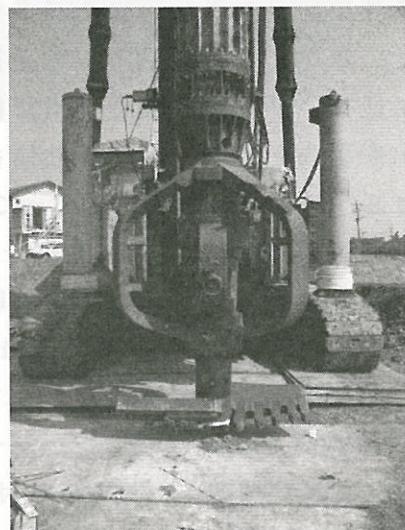


写真-1 複合相対攪拌装置

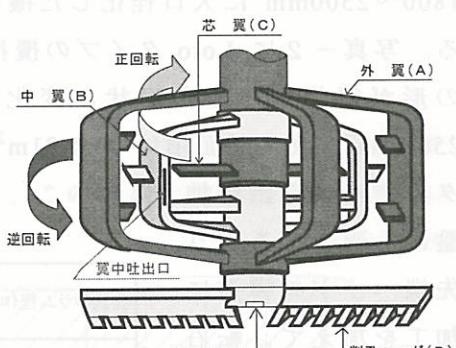


図-1 複合相対攪拌翼構造図

*1) Shoichi KONDO 福岡県福岡市博多区博多駅南 2-1-5 TEL;092-474-6611 FAX;092-474-6614
*2) Wataru NISHIO 東京都千代田区神田錦町 3-21 TEL;03-6386-7044 FAX;03-6386-7044
*3) Toshihiko TAKEDA 東京都千代田区神田錦町 3-21 TEL;03-6386-7036 FAX;03-6386-7022
*4) Daisuke MATSUOKA 東京都千代田区神田錦町 3-21 TEL;03-6386-7036 FAX;03-6386-7022
*5) Kimihiko ICHIKAWA 北海道札幌市中央区北 3 条西 1-1 TEL;011-219-6560 FAX;011-219-7887
*6) Masatsugu MIURA 福岡県京都郡苅田町二崎 58-15 TEL;0930-23-1118 FAX;0930-23-1119
*7) Kunio SAITO 東京都文京区春日 1-13-27 TEL;03-3817-1804 FAX;03-3817-1803
*8) Kouki TAKAKURA 福岡県福岡市博多区東比恵 2-20-25 TEL;092-412-0263 FAX;092-412-4889

2. 複合相対攪拌工法の概要

2. 1 攪拌機構²⁾

攪拌ケーシングに取り付けられた複合相対攪拌装置の外観は、写真-1に示すとおりである。また、図-1は同装置の攪拌翼構造図である。同図より、攪拌装置は軸端に先端吐出口を備えた削孔ヘッド、その背後には3枚の籠状外翼とその内部に2枚の籠状中翼、さらに芯翼から成る。外翼と中翼の間隔は140~400mmで、この隙間に向い合うように両翼から厚50mm×幅100mmで傾角30°の水平補助翼が取り付けられている。また、中翼の鉛直部には、翼中吐出口が設けてある。攪拌翼を回転駆動させるトルクは最大355kN·m(回転数4.8rpm)であり、従来工法のそれに較べておよそ3倍の削孔・攪拌能力を有する。

2. 2 複合相対攪拌工法の改良仕様と適用性

近年、地盤改良に課せられる施工条件は、より厳しい場合が多くなっている。これに対処するため複合相対攪拌工法は攪拌混合機構に様々な工夫を加えて削孔・攪拌性能を向上させ、適用範囲の拡大を図っている。

(1) 改良径の拡大と削孔性能

複合相対攪拌工法の分類と改良仕様の関係を整理して表-1に示す。まず、S工法は開発当初の機種で標準型に相当し、攪拌翼径が最大 $\phi 1600\text{mm}$ で改良断面積 $A=2.01\text{m}^2$ である。このプロトタイプを高トルク化して開発された機種が、硬質地盤対応型である。一方、改良コストを大幅に縮減することを目的に攪拌翼径を $\phi 1800\sim 2500\text{mm}$ に大口径化した機種がLotoタイプである。写真-2にLotoタイプの攪拌翼装置を示す。外翼の形が籠状から三角形状に変化させ、最大翼径は $\phi 2500\text{mm}$ で改良断面積は $A=4.91\text{m}^2$ である。さらに、Tafタイプは改良困難地盤にも適合するよう

先端ヘッドの構造に加工を加えて、転石やドレン材、地盤改良固化盤等の地中残存物地盤に対し、 $\phi 1500\sim 2500\text{mm}$ の改良径が推奨される。

(2) 攪拌翼径と適用地盤

表-2は複合相対攪拌工法(エポコラム工法)の適用性を土性とN値に対して取りまとめた。砂地盤では $N \leq 30\sim 40$ 、粘性土地盤では $N \leq 6\sim 20$ 、礫質土に対しては $N \leq 30\sim 40$ 程度を目安に施工可能である。また、Tafタイプの複合相対攪拌方式では粒径300mm程度の転石が介在する

表-1 複合相対攪拌工法の各仕様と改良コラム径²⁾

仕様分類	摘要	改良コラム	
		攪拌翼径(mm)	改良断面積(m^2)
複合相対攪拌-S工法	標準	$\phi 800\sim 1600$	0.50~2.01
	硬質地盤対応型	$\phi 1500\sim 1600$	1.77~2.01
複合相対攪拌-Loto工法	大口径型	$\phi 1800\sim 2500$	2.55~4.91
複合相対攪拌-Taf工法	地中残存物処理型	$\phi 1500\sim 2500$	1.77~4.91

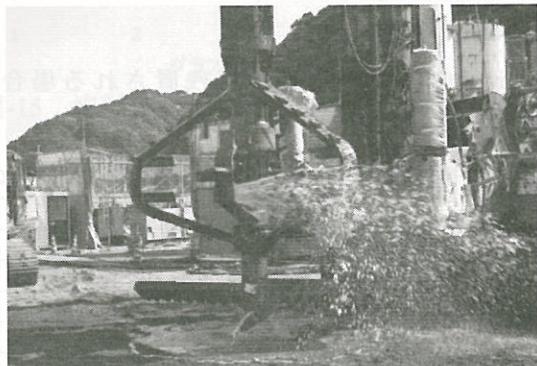


写真-2 エポコラム-Loto工法攪拌装置

表-2 複合相対攪拌翼径と適用地盤²⁾

改良コラム径(mm)	攪拌能力 ^{*1)}			支持層への根入れ能力 ^{*2)}		
	砂質土	粘性土	礫質土	砂質土	粘性土	礫質土
$\phi 1500\sim 2500$	$N \leq 30\sim 40$	$N \leq 6\sim 20$	$N \leq 30\sim 40$	$N \leq 40\sim 50$	$N \leq 12\sim 20$	$N \leq 40\sim 50$

*1) 矿質土では混入率30%程度以下でありN値40~50層が1~2m厚層状以下を標準とする。

*2) 支持層根入れ長は上記N値の0.5~1.0m程度を標準とする。

地盤や、 N 値 20~40 の固結した硬質シルト層（土丹層）にも適用できる^{2,3)}。このように従来技術では対応できない地盤でも補助工を併用することなく、直接、本工法を適用して改良施工を行うことができ、工期の短縮が図れる。

(3) 残置 PC 杭破碎施工の適用

地盤改良工においては、地盤内的一部分に旧構造物の基礎として打設された PC 杭やコンクリートがら、がれき、ドレン材等の中障害物が残置されている状況に遭遇する³⁾。例えば、旧建造物跡地に PC 杭が残置されている地盤を改良する場合、施工手順は図-2 のようになる⁴⁾。本来の地盤改良工に先行して、杭の頭出しならびにケーシングを用いた杭の迎え掘り撤去工等の補助工が必要である。

しかしながら、こうした補助工を省略することができれば、工期・コストを大きく縮減することも可能となる。一方、図-3 は PC 杭残置地盤における Taf 工法の施工手順である。高トルクの出力機能を持つ本工法では、何らの補助工を必要とすることなく、地中障害物が介在しても一工程で残置杭を破碎しながら改良体が造成できる。なお、新たに開発した Taf 工法では、掘削ヘッドと相対攪拌翼の外翼に対して技術改良が加えられている。掘削ヘッドの中心部に削孔と地中残存物を破碎・破断し、鋼線のような線状物の巻取り機能を担う錐を模した機構を付加した。この機構と高トルク攪拌構造を組合わせ、PC 杭が残置された地盤において、改良体断面内で接触する PC 杭を破碎しながら攪拌改良することが可能である。

3. 適用事例

3.1 液状化対策を目的とした礫質土の施工事例¹⁾

(1) 地盤概要

道路建設では、計画された路線下の地盤構成が大きく変化する。このため、地盤性状の見極めと

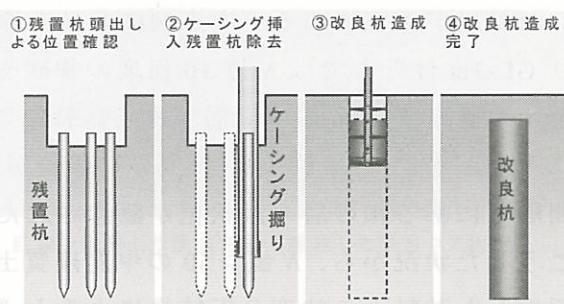


図-2 PC 杭残置地盤における従来工法施工手順

①残置杭 ②杭破碎と複合攪拌施工 ③改良杭造成完了

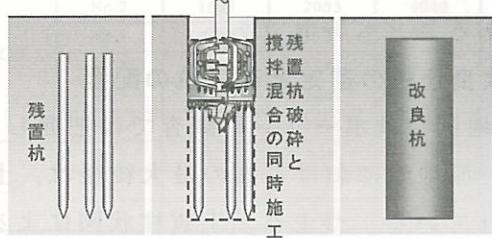


図-3 PC 杭残置地盤における Taf 工法施工手順

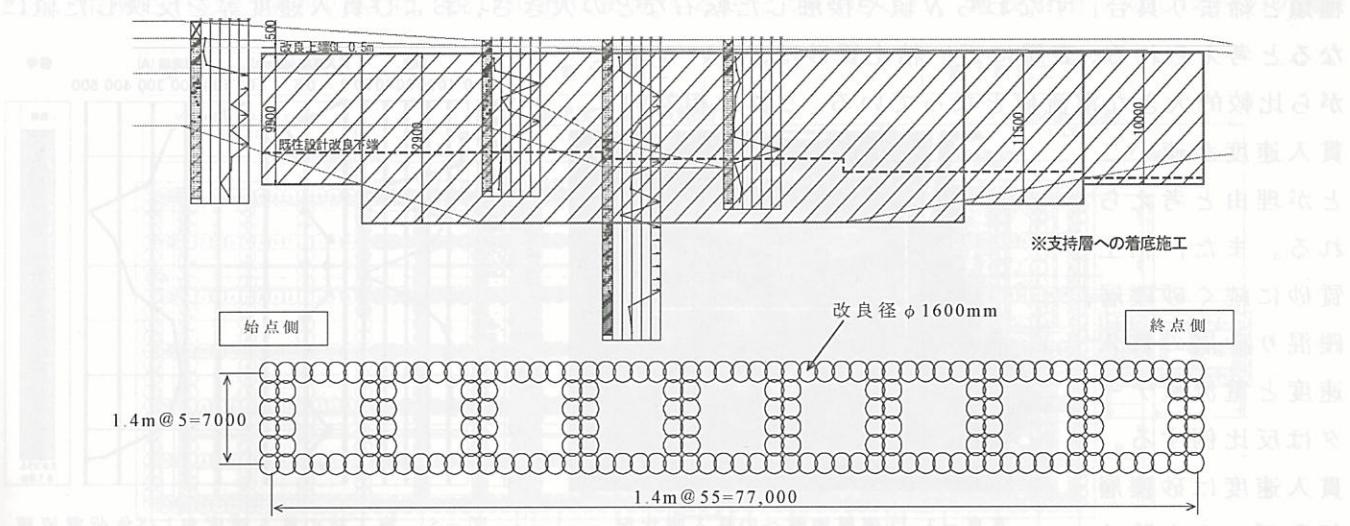


図-4 地盤縦断図と改良杭格子状配置図

適切な対処が重要である。本事例における原地盤の土質縦断図を図-4に示す。地盤構成は、表層より GL-3m 付近までは N 値 10 程度の細砂や礫質土である。その下にやや複雑に入り込んだ高い N 値を示す層厚 6~7m の中間層がある。特にこの中間層には、換算 N 値 = 200 の礫質土が存在し、さらにその下層には N 値 < 11 程度の砂礫層が続く。また地下水位は、GL-3m 近傍に位置しており、中間層下にある細砂層の液状化が懸念された。

こうした状況から、 N 値 > 50 の中間礫質土層を貫通可能な施工技術が課題となった。施工地点より採取した試料土の粒度分析結果によると、礫分 3~89%、砂分 9~80%、細粒分 2~26% であり、マトリックスの大部分が礫分と砂分から成る。また礫の粒径は 300mm 以上の玉石を含む巨礫層である。本地區に見られる巨礫は、水流によって運ばれて再堆積したと考えられ、岩質は非常に硬い岩石であることも特徴である。

(2) 改良仕様の選定と改良杭の配置

本地區ではボーリング調査では把握しきれない、大きな巨礫玉石が認められた。既往の経験によれば、原地盤における真の最大粒径は、土質調査で判定された最大粒径の 3 倍程度になることが指摘されている。つまり、土質柱状図によると介在する礫粒径は 50~100mm 大を示しており、粒径 150~300mm 大の転石が緩い礫質土内に点在していることが予測された。

こうした判断の下に、本改良工事では最も高いトルク機能を発揮する改良径 $\phi 1600\text{mm}$ の硬質地盤対応型の攪拌装置を用いることとした。また、改良杭の配置は、液状化対策で経済性の高い格子状配置を採用した。図-4 に $\phi 1600\text{mm}$ 改良径による格子状配置を示す。ただし、格子状改良の接合部は重要であり、改良杭間を 0.2m ラップさせる。施工仕様は貫入長 $L=10.4\sim 12.0\text{m}$ 、改良長 $L_c=9.9\sim 11.5\text{m}$ 、格子状改良の改良面積比 $a_p=55.6\%$ 、設計改良強度 $q_{ud}=400\text{kN/m}^2$ である。改良強度を発現するためのセメント混入量は $a_w=160\text{kg/m}^3$ とした。

(3) 施工効率

写真-3 に硬質地盤対応型の複合相対攪拌工法を適用した施工状況を示す。先端の削孔ヘッドが貫入し、攪拌翼直下に粒径が 300mm 大の礫が露出している。硬質地盤対応型複合相対攪拌機能を持つ本工法の施工速度は、セメント混入量に応じて平均的な貫入速度 $V_d=0.5\text{ m/min}$ 、引抜き速度 $V_u=1.0\text{ m/min}$ と設定した。しかし、転石や締まった礫質土に接触すると、駆動モータに供給される負荷電流値に大きな変化が生じる。図-5 は始点側に近い工事箇所の地盤構成と N 値で、その地点の施工中に記録した駆動オーガの貫入速度および負荷電流値のデータである。負荷電流値は、地盤の種類と締まり具合、すなわち N 値や接触した転石などの大きさ、および貫入速度等を反映した値になると考えられる。表層に近い粘土質砂は、低い N 値ながら比較的大きな電流値となっている。これは相対的に貫入速度が速いことが理由と考えられる。また、粘土質砂に続く砂礫層、礫混り砂層の貫入速度と電流値データは反比例する。貫入速度は砂礫層部のデータを除く

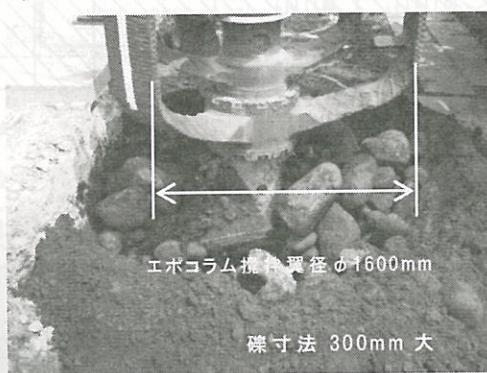


写真-3 巨礫層地盤への貫入時状況

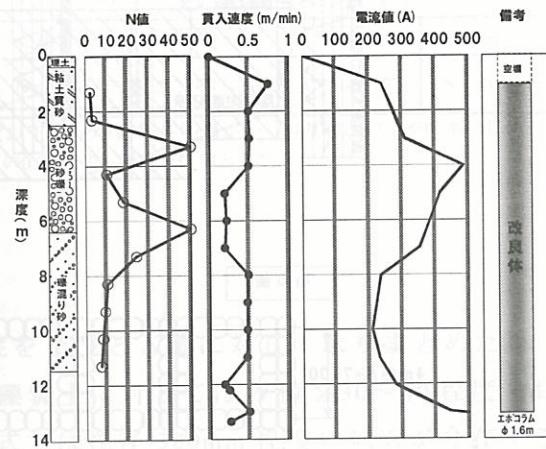


図-5 施工杭の貫入速度および負荷電流値

と、計画した貫入速度 $V_d=0.5\text{ m}/\text{分}$ が保たれているようである。砂礫地盤ではやや施工速度が低下するものの、施工不能となることなく、仕様にしたがって工事を完了することができた。ただし、攪拌翼の消耗度は高く、特に先端ヘッドの交換や消耗対策の重要性が認識された。

(4) 改良品質

施工後に造成した改良杭体より、コアを採取して直径 $65\text{mm} \times$ 高さ $h130\text{mm}$ の供試体を作製し、現場改良強度を確認した。写真-4は、改良体の上層部、中層部および下層部からそれぞれ採取した供試体である。供試体表面に礫が斑点状に存在したり、側面を大きな礫断面で占める場合もあり、巨礫が破碎された形跡が確認できる。また、目視ながら礫と固化材間の隙間は認め難く、両者は一体となっている。表-3は供試体コアの現場改良強度の結果である。現場改良強度は $q_{uf}=812\sim9,355\text{kN/m}^2$ と広範囲に分布した。改良体の設計改良強度は仕様を十分に満足するものの、複合相対攪拌翼によって岩石、礫質土、土砂が破碎・攪拌されることから、改良強度の分布が必然的に広くなったものと推測される。写真-5は改良杭体の出来形を空撮した状況であり、設計通りに格子状改良されたことが確認できる。

3. 2 浄水施設更新事業に伴う残置PC杭の破碎・攪拌同時施工事例

(1) 事業計画

本事業は、政令都市に隣接する地区において、工業団地への工業用水を安定供給するための浄水施設更新事業である。しかしながら、現浄水施設は設置後48年が経過し、老朽化と耐震性などに懸念が指摘された。検討の結果、現行位置に更新することが決定され、施設用地に対し支持力の増



写真-4 巨礫を破碎した改良杭から採取した改良コア状況

表-3 磨質地盤の現場改良強度 $q_{uf}(\text{kN/m}^2)$

	改良杭No.	上層部	中層部	下層部
A工区	No.1	3010	4470	5636
	No.2	1603	2055	4040
	No.3	4118	1115	5267
	No.4	6179	5341	6218
	No.5	6715	7668	9355
	No.6	9355	7976	5292
B工区	No.1	812	818	3728
	No.2	2197	3557	4101
	No.3	1765	2008	4086

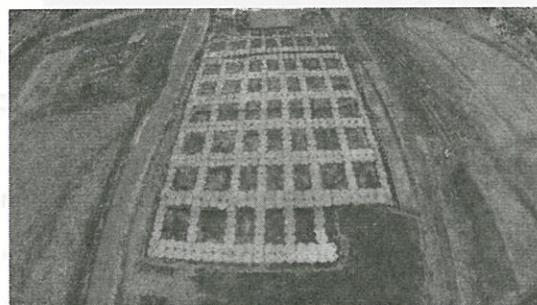


写真-5 エポコラム施工による格子状改良

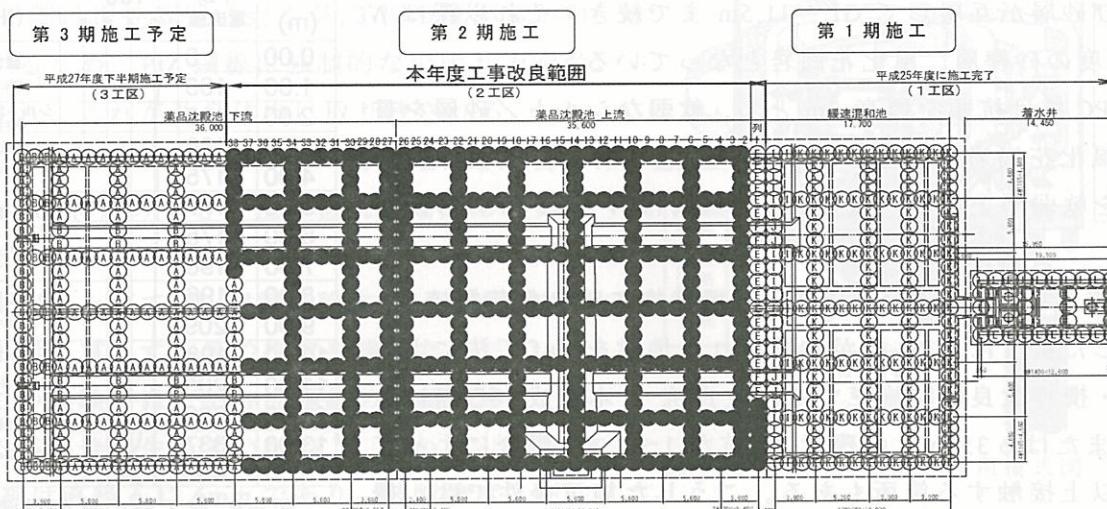


図-6 Taf改良杭の配置平面図

強と耐震対策としての液状化防止を目的とした地盤改良工が検討された。このとき、旧施設は $\phi 350\text{mm}$ と $\phi 300\text{mm}$ の 2 種類の PC 杭を用いた基礎構造であり、その処分と改良施工の調整が懸案となつた。こうした背景から、残置されている PC 杭を除去せずに破碎・改良攪拌が同時に可能な Taf 工法が経済性等の面から最適工法として選定された。

(2) 既設 PC 杭位置と Taf 杭の配置位置の関係

図-6 は、新設される浄水施設の Taf 改良杭の配置平面図である。図中、右側部分が第 1 期施工区、中央の黒色部が第 2 期施工区、左側部分を第 3 期施工区に分けて、地盤改良工が実施される。なお、新浄水施設は、旧施設とほぼ同じ面積である。

一方、図-7 は 48 年前の建設時に示された旧浄水施設の PC 杭の伏図上に Taf 改良杭 $\phi 1600\text{mm}$ を格子状に配置した場合の図面である。

残置された PC 杭は $\phi 300\text{mm}$ および $\phi 350\text{mm}$ であり、頭部位置は施工基面 GL-1.0m の位置にある。また、PC 杭は 1.5~2.3m の正方形ピッチに配置されている。第 2 期施工区内に残置された PC 杭は 756 本である。Taf 改良杭の施工において、残置 PC 杭と接触する頻度をみると、Taf 改良杭の施工本数 504 本中の約 80% の 398 本が該当する。また確実に接触する残置 PC 杭は約 250 本となる。

(3) 地盤概要と改良体位置

土質柱状図と残置 PC 杭および Taf 改良杭位置の関係を図-8 に示す。地盤は、地表面付近 1.5m が盛土で、その直下にシルト混じり砂が認められる。さらに N 値 0~1 程度の緩いシルトおよび砂層が互層して GL-11.5m まで続き、それ以深は N 値 30 程度の砂礫層、風化花崗岩となっている。

既設 PC 杭は杭頭を標高 -3m とし、軟弱なシルト／砂層を貫通して風化花崗岩部に達している。これに対し、改良体はその上面を軟弱層上部に一致させ、着底層は N 値約 30 の砂礫層とした。

(4) Taf 工法による残置 PC 杭破碎・攪拌施工時の負荷電流値

前述したように、PC 杭が残置された地盤を Taf 工法によって破碎・攪拌改良同時施工では、改良杭 1 本造成する際に $\phi 300\text{mm}$ または $\phi 350\text{mm}$ の残置 PC 杭が 1~2 本、場合によってはそれ以上接触する箇所もある。こうした施工条件では、攪

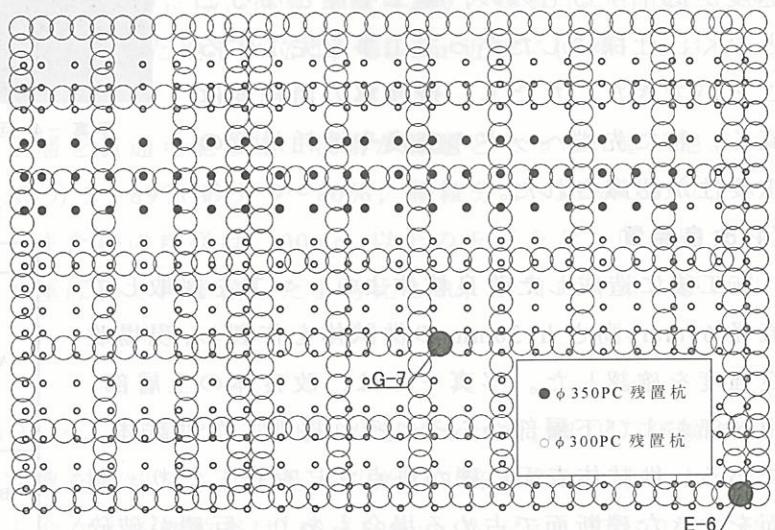


図-7 Taf 改良杭体と残置 PC 杭との重ね合せ図

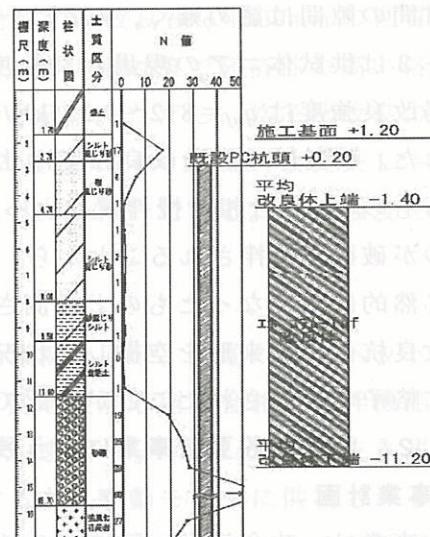


図-8 土質柱状図と改良位置

深度 (m)	電流値(A)					土質区分 (N値)
	平均 電流値	$\times 100$				
		2	4	6	8	
0.00	0					盛土 (N=1)
1.00	165					シルト混じり砂 (N=1)
2.00	192					砂混じりシルト (N=1~2)
3.00	189					シルト混じり砂 (N=1~2)
4.00	175					砂混じりシルト (N=1~2)
5.00	177					シルト質粘土 (N=0~1)
6.00	175					砂礫 (N=19~60)
7.00	196					
8.00	196					
9.00	209					
10.00	198					
11.00	205					
12.00	299					
13.00	337					
13.50	499					

図-9 施工時の負荷電流値

拌破碎音や機械振動は、必然的に通常施工より大きくなる。図-9は、Taf施工による残置PC杭を破碎・攪拌改良同時施工した改良杭の平均的な負荷電流値である。貫入攪拌時の負荷電流値は、PC杭と接触しているにも係わらず、約200A程度であり、PC杭に接触しない改良杭との大差はなかった。残置PC杭との接触確率が約80%と高く制御の難しさが懸念されたが、N値20~30の礫地盤へ着底できた。写真-6にTaf工法による施工状況を示す。

なお施工仕様は貫入長平均L=12.34m、改良長平均Lc=10.73m、 ϕ 1600mm 改良杭径による格子状配置のラップ長は0.2mである。設計改良強度 $q_{ud}=900\text{kN/m}^2$ で、セメント混入量は $a_w=180\text{kg/m}^3$ (固化材 GS200, W/C=1.0)である。

(5) PC杭の破碎とPC鋼線の回収メカニズム

Taf工法では、残置PC杭を破碎しながら所定の改良体を造成するが、その過程における杭体中のPC鋼線の挙動は大きな関心事である。当事例における施工サイクル(PC杭を破碎しながらの貫入攪拌→先端処理→引抜攪拌)において特段の問題は生じていないが、攪拌翼引抜直後のPC鋼線の状況は写真-7に示すとおりである。攪拌翼先端のビットに相当量のPC鋼線が巻き取られている。また、写真-8は回収したPC鋼線の集積状況である。

Taf工法におけるPC杭の破碎、PC鋼線の巻き取りメカニズムは、図-10に示すように考えられる。すなわち、攪拌翼先端ビットがPC杭を押し潰すように破壊し、PC鋼線は先端ヘッドの回転と共にビットに巻き取られ、さらにこれに伴って杭の破壊が促される。PC鋼線の一部は攪拌翼間に到るが、3枚の攪拌翼が相互に反転するため、PC鋼線は強制的な引張り力を受けて破断され、これが改良体内に取り残される。

しかしながら、施工の一部において先端ビット部にPC鋼線が多量に絡みつき、攪拌抵抗が増大して貫入不能となることも生じた。その際には施工を一旦中断して攪拌翼を引上げてPC鋼線を除去し、改めて中断した深度まで再貫入する等の措置を講じた。

これまでの経験では、 ϕ 8mm鋼線の実績が多く、絡まりによる不都合は生じていない⁴⁾。しかし、本残置PC杭の鋼線は直径 ϕ 12.6mmであり、破断強度・剛性



写真-6 現場全景

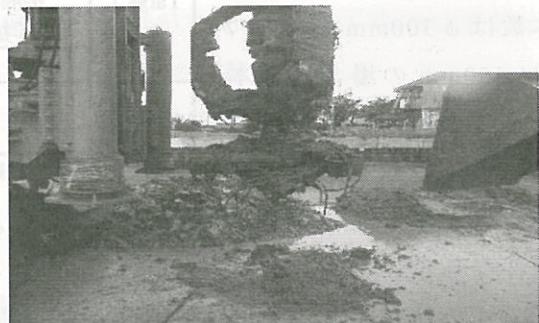


写真-7 先端ヘッドに巻付いたPC鋼線

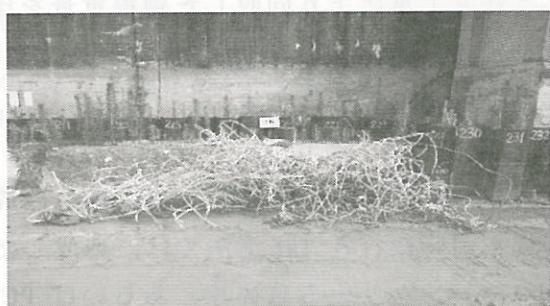


写真-8 回収したPC鋼線集積状況

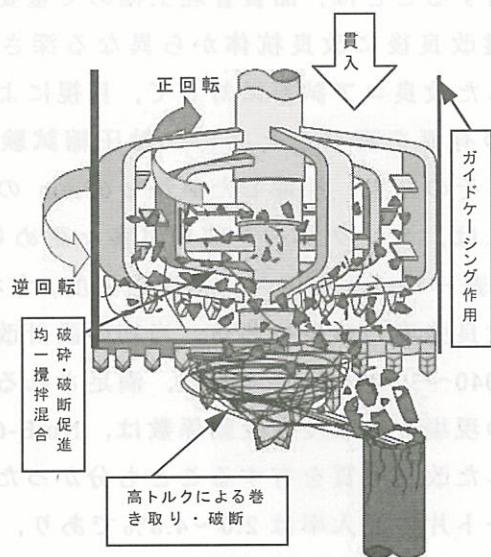


図-10 残置PC杭破碎作用模式図³⁾

が大きく、これが攪拌翼に幾重にも絡まり、攪拌翼先端の削孔部に大きな抵抗体が形成されたものと推測される。

回収した PC 鋼線量を評価するため残置された PC 杭の仕様を調査した。しかし、48 年前の製品であり、明確に把握することはできなかった。PC 鋼線の実測直径は ϕ

12.6mm であり、これと現

在の PHC 杭の規格から鋼線本数は $\phi 300\text{mm}$ の杭で 7 本、 $\phi 350\text{mm}$ の場合は 8 本であることから、この値に

鋼線の単位重量を乗じ、残

置 PC 杭 1 本の単位長さ当たり重量を算した。計算条件ならびに計算結果を表-4 に示す。さらに表-4 の結果に基づき、接触破碎した残置 PC 杭本数と種類、杭長を考慮して総鋼線重量を求め、これと工事により回収した鋼線重量を比較したところ、鋼線回収率 59.5% の結果を得た。計算の根拠を表-5 に示す。

(6) 改良品質

PC 杭が残置された地盤に対し、杭の破碎と地盤改良を同時に行う Taf 工法では、造成した改良杭体中にコンクリート破碎片、あるいは PC 鋼線の破断片が混入することが推察される。こうした異物の混入が改良杭体の強度特性に及ぼす影響を検討することは、品質管理上極めて重要である。

地盤改良後に改良杭体から異なる深さごとに採取した改良コア試料に対して、目視による異物混入の有無を調べると共に一軸圧縮試験を実施した。その結果、採取した直径 $\phi 65\text{mm}$ の改良コア内には、コンクリート破片が多々認められた。また、表-6 は改良体の一軸圧縮強度、すなわち、

現場改良強度の結果である。当初の設計改良強度 $q_u=900 \text{ kN/m}^2$ に対し、改良杭体の現場改良強度 $q_{uf}=2,040 \sim 3,703 \text{ kN/m}^2$ であり、満足される強度を保持していることが確認された。さらに Taf 改良杭体の現場改良強度の変動係数は、No.E-6 で $v=15\%$ 、No.G-7 で $v=18\%$ となり、ばらつきの少ない安定した改良品質を有することも分かった。なお、既往の調査では改良杭体内に残る PC 杭のコンクリート片の混入率は 2.0~4.8% であり、平均的には約 3.0% であると報告されている³⁾。写真-9 は Taf 工法による改良杭体造成後の状況である。改良径、杭芯位置、打設ピッチ等、すべてにおいて基準値内に収まる結果が得られ、設計通りの格子状改良となった。

表-4 既設 PC 杭仕様の推定

杭径 (mm)	杭断面積 (cm ²)	PC鋼線			
		公称径 (mm)	鋼線本数 (本)	断面積 (cm ²)	単位重量 (kg/m)
300	452	12.6	7	6.3	6.867 (0.981×7本)
350	452	12.6	8	7.2	7.848 (0.981×8本)

表-5 PC 残置杭の破碎同時施工による鉄筋回収率

Taf施工 本数 (本)	接触破碎した PC杭本数 ¹⁾		PC杭 接觸率 (%)	Taf施工 杭長 (m)	PC鋼線 延長 (m)	PC鋼線 重量 (t)	PC鋼線 回収重量 (t)	PC鋼線 回収率 (%)
	$\phi 300$	$\phi 350$						
398	207	37	61.3	12.17	21,126	20.67	12.3	59.5

*1)PC鋼線本数 $\phi 300\text{mm}$:7本、 $\phi 350\text{mm}$:8本

表-6 改良杭体の現場改良強度

杭No.	採取 箇所	現場改良強度 q_{uf} (kN/m ²)			変動係数 (%)
		1	2	3	
No.E-6	上層	2,430	3,065	3,291	15
	中層	3,703	2,403	2,882	
	下層	2,600	3,376	3,139	
No.G-7	上層	2,133	2,723	2,928	18
	中層	3,029	2,040	3,082	
	下層	2,138	3,346	3,083	



写真-9 格子状改良の Taf 施工状況

4.まとめ

本文では、複合相対攪拌方式によるエポコラム工法を用いた巨礫を含む礫質土地盤と、建造物跡地に接触率 80%と多数残置された既設 PC 杭の破碎・攪拌改良同時施工の事例を示した。

今日、地盤改良が要請されるケースとして、土層が複雑で礫質土、玉石、転石や硬質土が狭在する地盤、砂礫地盤であっても高機能化が求められる地盤改良、既設杭や既に他の地盤改良が施されている地盤等々、これまで対象としていない地盤条件に日々遭遇している。

複合相対攪拌方式であるエポコラム工法は、低速回転ながら高いトルクと相対反転する攪拌翼構造を組み合せて、通常の工法では不可能とされる地盤を確実、安定的に改良することができる。本工法の特色は単にその技術的優位性に止まらず、むしろコスト縮減に大きく貢献できる点にある。すなわち、従来技術では予め補助工により施工条件を確保する必要があるが、本工法では直接、地盤改良工事の実施が可能である。その結果、工期、工費の抑制に大きく寄与する。

地盤改良が要請される対象が多様化する中で今後ともこれに適切に応え得る、より強力で確実な技術開発を銳意目指す所存である。

【参考文献】

- 1) 松岡大介・西尾経・竹田敏彦・石橋豊明・高倉功樹・齋藤邦夫：巨礫を含む礫質土の改良に適用した複合相対攪拌工法の概要と施工事例、第 11 回地盤改良シンポジウム、pp.327~330、2014.11
- 2) (財)先端建設技術センター：先端建設技術・技術審査証明報告書「エポコラム工法(エポコラム-Loto 工法・エポコラム-Taf 工法)」、pp.18~21、2011.3
- 3) 鈴木孝一・西尾経・田中信哉・原満生・高倉功樹・齋藤邦夫：エポコラム-Taf(タフ)工法＝残置杭破碎工と地盤改良工の同時施工、建設機械 No.557、Vol.47、No.7、pp.60~66、2011.7
- 4) 西尾経・竹田敏彦・木下和徳・齋藤邦夫・高倉功樹：エポコラム-Taf 工法による残置 PC 杭破碎と地盤改良の同時施工攪拌機構および施工事例、第 11 回（平成 24 年度）技術報告会論文集、北海道土木技術会、pp.9~16、2013.1

写真 2 小型振動棒
盤状貝殻分離

写真 3 振付攪拌器
盤状貝殻分離

図 4 土質改良工事検討図



狭所での液状化対策を目的とするスマートコラム工法の開発

株式会社 竹中土木 技術・生産本部 山田 修三

株式会社 竹中土木 技術・生産本部 今井 政之

株式会社 竹中土木 技術・生産本部 小西 一生

1.はじめに

液状化対策工法の一つに格子状地盤改良工法（TOFT 工法）がある。格子状地盤改良工法による対策効果は、1995 年の兵庫県南部地震や 2011 年の東北地方太平洋沖地震の際にも確認されており^{①②}、現在に至るまで土木構造物や建築基礎に対して多くの施工実績がある。一方、東北地方太平洋沖地震以降、液状化被害を受けた戸建住宅への対策や、今後液状化被害を受けることが想定される既設構造物への液状化対策が強く望まれている。しかし、これまでの格子状地盤改良工法は新設構造物への適用がほとんどであり、工事に用いる機械は大型であるため、狭小地である既設構造物への適用が困難であった。本報告では、格子状地盤改良工法を狭小地へ適用するために開発した小型地盤改良機（スマートコラム工法）について述べる。

2. 格子状地盤改良工法（TOFT 工法）の概要

格子状地盤改良は深層混合処理工法を用いて地面の中に図 1 のような格子状の改良体壁を構築する工法である。通常は写真 1 のような 2 軸～4 軸タイプの施工機械を用いて、改良杭をラップさせながら施工することで壁を形成する。図 2 に格子状地盤改良工法の液状化防止のメカニズムを示す。地震によって地盤に繰返しせん断応力が作用することで、軟弱な砂地盤のせん断変形が大きくなり、過剰間隙水圧が上昇することで液状化が発生する。本工法により、液状化地盤を改良体壁で囲うことにより、地震発生時においても地盤のせん断変形が小さくなり、過剰間隙水圧の上昇を抑制することで液状化を防止するものである。

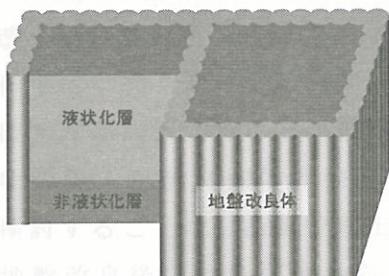


図 1 格子状地盤改良の概要

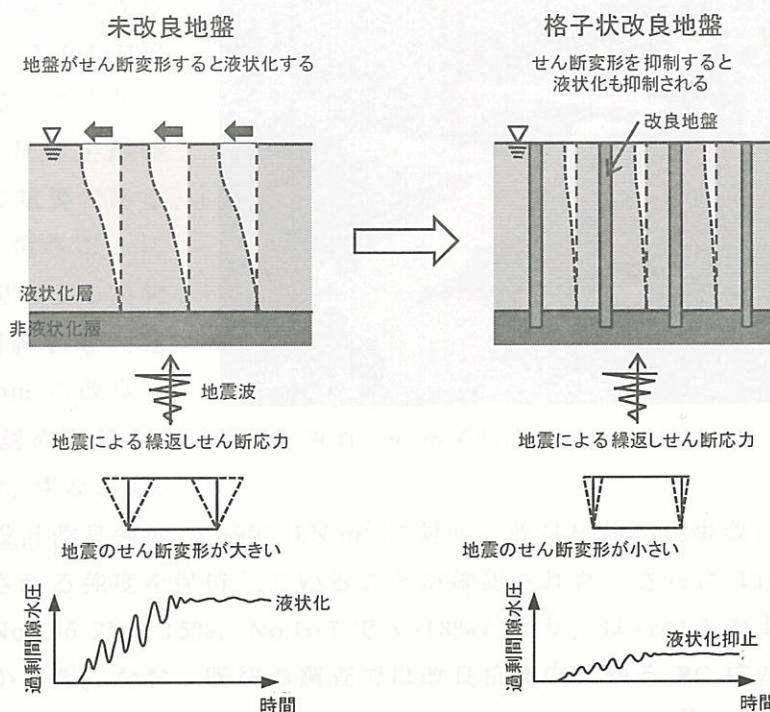


図 2 格子状地盤改良の液状化防止メカニズム

3. 小型単軸地盤改良機の概要

3.1 単軸機の開発

格子状地盤改良を施工するにあたり、改良杭をラップさせて施工する格子壁の一体性が重要であり、改良杭の鉛直精度の確保が必要となる。従来、宅地において柱状改良を行う目的として使われてきた小型単軸機は、 $\phi 500\sim 600\text{mm}$ 程度の小径であり、多軸で $\phi 1000\text{mm}$ の大型機と比較してロッドの剛性や掘削力が低いため、改良杭の鉛直精度の確保が困難になることが予想された。そこで鉛直精度を確保するために、掘削翼および共回り防止翼に改良を施した。写真2に小型単軸機を示す。ベースマシンは 0.45m^3 級バックホウと同クラスの小型汎用地盤改良機である。開発機は従来の大型機に比べて占有面積が27%となっており、また機械の運搬・設置にも多くの機材と時間を必要としないため、狭所での施工を可能としている。写真3に改良した特殊搅拌翼を示す。掘削力の低下への対策として、掘削翼をスパイラル型に変更し掘削トルクを低減させることで掘削力の向上を図った。図3に共回り防止翼の改良について示す。共回り防止翼に受圧板を掘削する円周に沿った形状に配置することで、周辺地盤からの抵抗により面外方向への変位を抑制する。面内方向の変位は、受圧板から外側に突起を張り出させることで抑制を試みた。



写真2 小型単軸機



写真3 特殊搅拌翼

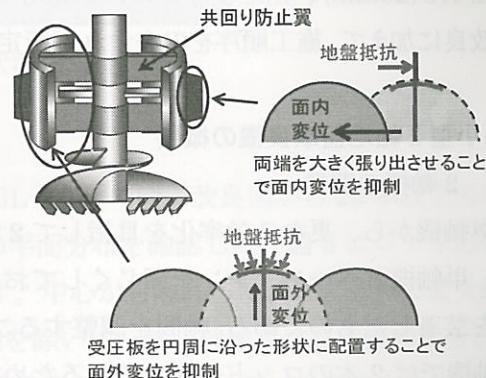


図3 共回り防止翼の改良概要

3.2 単軸機の品質確認

開発した単軸機による改良体の品質と、改良体造成時の精度について現地盤での確認を行った。図4に土質柱状図と造成した改良体の深度方向の一軸圧縮強度を示す。対象地盤はGL-3.0m～-10.0mまで緩い砂層となっており、地震時の液状化の発生が想定される地盤である。一軸圧縮強度は、改良体からコアボーリングにより採取したコアの28日強度である。1本の改良体に対し、杭の中心と改良体の直径をDとして中心からD/4の位置でボーリングを行い、改良体全長に対して1m当たり3個（計27個/本）の割合で採取したコアで行った。全てのコアで目標強度を上回っており、また変動係数は改良体の中心で17.0%、D/4の位置では17.4%となり、従来の大型機での平均値である25～30%を下回る良好な改良品質であることが確認された。

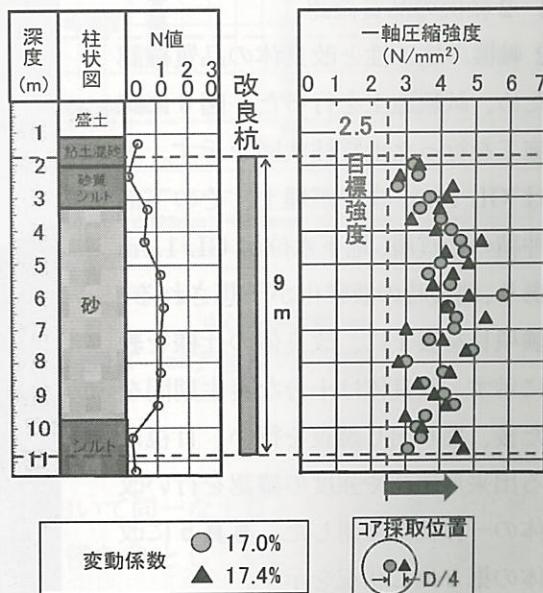


図4 土質柱状図と一軸圧縮強度

次に格子状地盤改良において重要な改良体の鉛直精度の確認を行った。特殊な挿入式傾斜計を用いて貫入終了後の掘削ロッドの建込精度を測定することで、改良体の鉛直精度とした。改良体をラップ施工する順序を、①1方向に連続して施工する片押し施工、②1本おきに施工した後に間を施工する1本おき施工の2パターンとして、それぞれの施工方法に対して鉛直精度の確認を行った。図5に掘削深度1m毎の変位量を上から見た軌跡図を示す。最終深度での改良体の変位

量は、片押し施工の場合、通常のTOFT工法での目標変位量である1/200(55mm)以下を満足することは難しい結果となった。これは一つ前に施工した箇所がスラリー状になっているのに対し、反対側は現地盤のままであり、貫入時により柔らかい方向へとロッドが逃げていくからだと考えられる。一方、1本おき施工の場合、打設列に対して平行方向1/478(23mm)、垂直方向1/647(17mm)と、目標の1/200の精度を満たす結果となった。掘削翼と共回り防止翼の改良に加えて、施工順序を工夫すれば所定の精度を確保できることを確認した。

4. 小型2軸地盤改良機の概要

4.1 2軸機の開発

単軸機から、更なる効率化を目指して2軸機の開発を行った。写真4に開発した小型2軸機を示す。当機は、単軸機とベースマシンを同じくしており、軸間距離の調節機能を有する新開発の2軸油圧オーガーヘッドを装着したものである。軸間を調整することで、改良径 $\phi 800\text{mm} \sim \phi 1,000\text{mm}$ までの対応が可能である。2軸機では2本のロッドを繋いでいるため構造的に剛性が高くなっているが、単軸機に装備した特殊搅拌翼がなくても、単軸機で問題となった掘削精度について確保できると考えられる。特に単軸機では改良壁構築時の面内方向の変位が大きくなっているが、2軸機では大きく抑制されると推測される。

4.2 2軸機の品質確認

2軸機の施工性と改良体の品質確認のため、試験施工を行った。図6に試験施工を行った土質柱状図を示す。地盤はGL-1.8mまでが埋土、その下部が沖積の砂質層、地下水位はGL-1.4mであり、地震時の液状化が予想される。試験項目を表1に、改良体の仕様を表2に示す。改良体は十分な養生期間を経た後、掘り出し調査を行い、目視による出来形確認や強度の確認を行い改良体の一体性を確認した。写真5に改良体の掘り出し状況を示す。

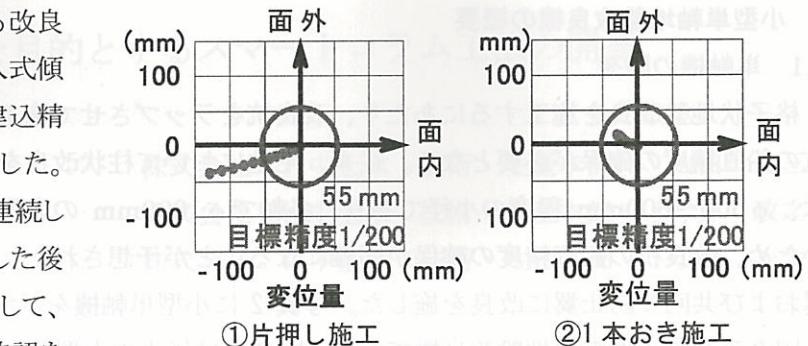


図5 ロッド変位の平面軌跡図



写真4 小型2軸機

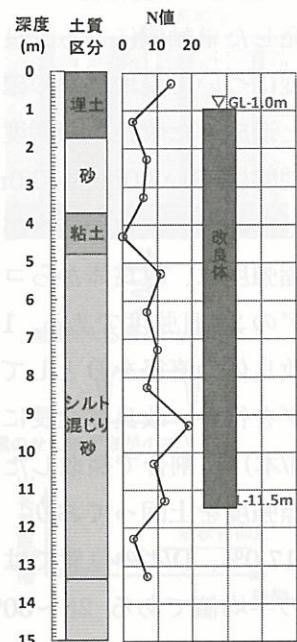


図6 土質柱状図

表1 試験項目

区分	管理項目	検査方法
改良体品質	改良体強度	ボーリングコアによる一軸圧縮試験 (深度方向・平面方向)
	改良強度のばらつき	

表2 改良体の仕様

区分	仕様
改良径	$\phi 1000 \times 2$ 軸
改良長	11.5m
W/C	100%
設計基準強度	1500kN/m ²



写真5 改良体の掘り出し状況

a) 改良強度の平面分布

図7にコア採取箇所の平面図を示す。改良体頭部において深度 GL-2.0m の同一改良面から 25 本以上のコアを採取し、一軸圧縮試験により改良体の 28 日強度の水平方向の平面分布を確認した。図8にコア中心をゼロとして、中心からの距離とコア強度の関係をグラフとして示す。中心から離れるに従い、強度の最大値と最小値の差がやや大きくなる傾向が見られる。コア 42 個中 2 個を除いて一軸圧縮強度は目標値である $F_c = 1,500\text{kN/m}^2$ を上回っている。表3に試験結果を示す。一軸圧縮強度は左側、中央部、右側で大きく差は見られず、変動係数は 17% となり、十分な品質であることが確認できた。

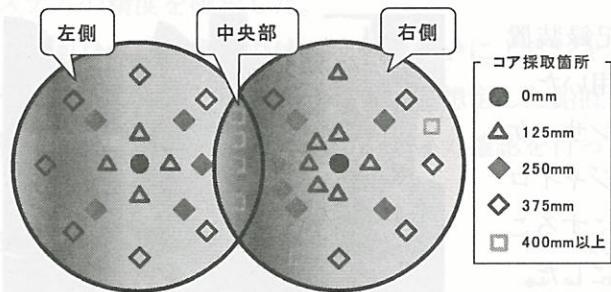


図7 コア採取箇所

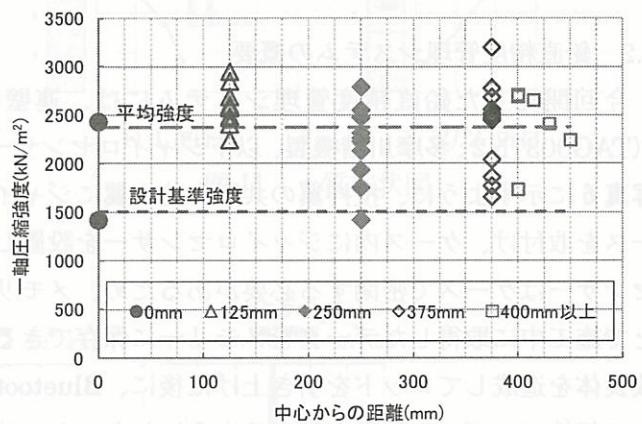


図8 コア強度の平面分布

b) 改良強度の深度分布

改良体に対して全長コアボーリングを実施し、採取したコアにおいて同一な土質とみなせる層ごとに供試体を作製して改良体強度の深度分布を確認した。コアは改良体の直径を D として中心から $D/4$ の位置で採取し、一軸圧縮試験は改良体造成後 28 日で実施した。同時に深さ 1m 毎のコア採取率を確認した。表4に試験結果を示す。各土層において設計基準強度を上回っており、変動係数についても $V=16.7\sim27.0\%$ と、目標値 30% 以内であることを確認した。

図12 フィルタセメント補斜材の結果比較

本工法の貫入・引抜き速度については、地盤の条件に応じた回転トルクの変動を勘案して、羽根切り回数を確保できるように 0.5~1.0m/min で設定することとしている。本試験では、当該地盤条件において安定した搅拌翼の回転を確保できるように、貫入速度を 0.7m/min (一部の引抜時 0.5m/min) で実施した。機械の小型化に伴いオーガー出力に制約がある本工法の適用条件として、施工計画時に留意すべき項目の一つである。さらに削孔条件が厳しくなる $N = 20$ となる区間 (GL-8.75~11.5m) においては、一定の貫入速度を維持するための試験的手法として、一時的なスラリー吐出量増量による回転トルクの低減を試みた。その結果、他の深度より発現強度が高い値となった。

5. 鉛直精度管理システムの開発

5.1 開発の目的

これまで述べてきたとおり、格子状地盤改良の施工にあたり、改良体の鉛直精度の確保が重要な課題である。単軸機の開発において、特殊な挿入式傾斜計によって改良体の鉛直精度を計測したが、この手法はロッドが改良下端深度に到達したときに一度施工をストップし、ロッドを施工機から外した状態で傾斜計を挿入しなければならず、計測にかかる時間と手間を考慮すると実施工における鉛直精度管理手法として利用することは難しい。そこでもっと簡便な方法で鉛直精度を管理できる手法として、鉛直精度管理システムの開発を行った。

5.2 鉛直精度管理システムの概要

今回開発した鉛直精度管理システムには、連壁軌跡記録装置 (TAG0037N2: 多摩川精機製、以下ジャイロセンサー) を用いた。写真 6 に示すように、搅拌翼の共回り防止翼にジャイロセンサーを取付け、ケース内にジャイロセンサーを設置した。ジャイロセンサーはケースで密閉する必要があるため、メモリー式にすることで施工中に取得したデータをメモリーに保存できるようにした。改良体を造成してロッドを引き上げた後に、Bluetooth® を用いることで無線でのデータ取得を行えるようにした。センサーの稼働時間は 1 日当たりの施工時間を想定して 10 時間とした。図 9 に鉛直精度管理システムの概要を示す。ジャイロセンサーによって改良体を施工中に得られるデータは、時間ごとの X 軸方向、Y 軸方向 (水平方向) の変位データである。一方、地盤改良機では常に時系列の深度データを記録しているので、これら 2 つのデータを合わせることで、水平および鉛直方向の改良体の打設軌跡管理図を作成することができる。この結果から隣接する改良体同士のラップ精度の確認を行う。図 10 に現地での計測の流れを示す。

表 3 試験結果 (平面分布)

	全体	左側	中央部	右側
一軸圧縮強度 (kN/m ²)	2375	2349	2505	2418
変動係数 (%)	17			
密度 (g/cm ³)	1.84	1.84	1.86	1.85
含水比 (%)	33	33	33	32

表 4 試験結果 (深度分布)

土質区分	区間 (GL-m)	圧縮強度(平均) (kN/m ²)	変動係数 (%)
砂	1.7-3.7	2286	22.2
粘土	3.7-4.8	2406	16.7
シルト混じり砂(1)	4.8-8.75	2831	27.0
シルト混じり砂(2)	8.75-11.5	6829	23.9



写真 6 ジャイロセンサー設置状況

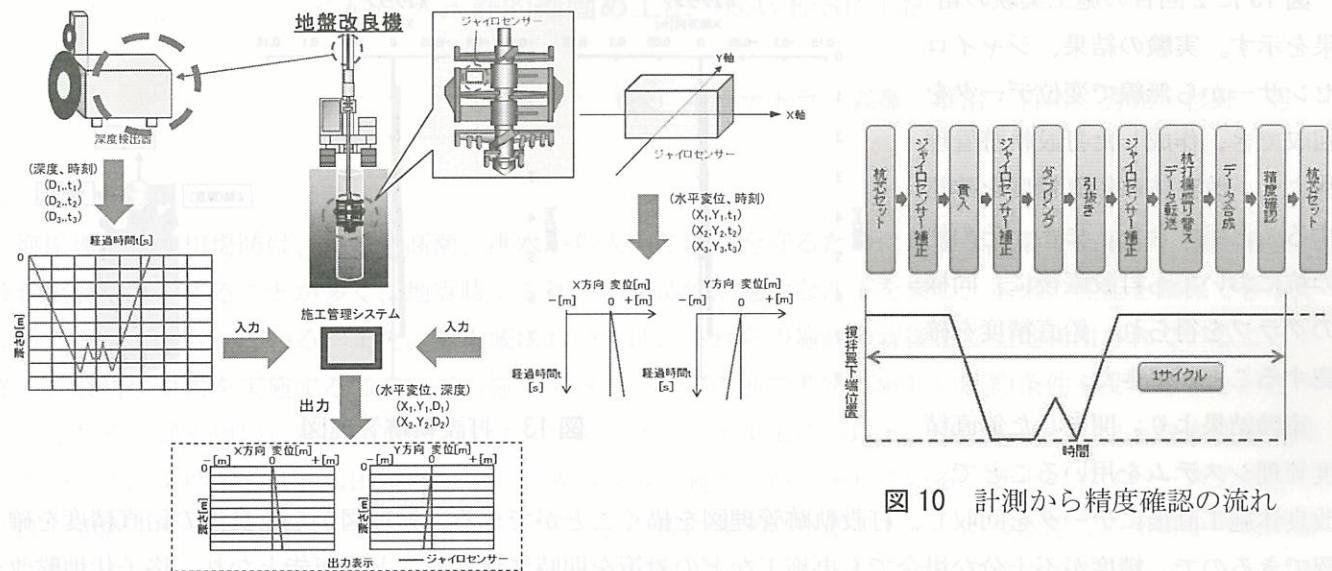


図 9 鉛直精度管理システムの概要

5.3 システム適用実験の概要

鉛直精度管理システムの適用実験を 2箇所で実施した。それぞれの土質柱状図を図 11 に示す。1回目に実施した地盤は主に砂で構成されており、2回目の地盤はロームや粘土層で構成されている。

1回目の施工実験では、管理システムの精度を検証するために、システムによる計測データと一般製品化された傾斜計 (TAG0012 : 多摩川精機製) を使用して計測したデータの 2種類を比較することで開発したシステムの精度を確認した。

2回目の施工実験では、Bluetooth®によるジャイロセンサーの無線化を行い、実工事を想定した鉛直精度管理システムとしての実用性について確認を行った。

5.4 実験結果

図 12 に 1回目の施工実験の結果を示す。X 軸方向変位、Y 軸方向変位とともにジャイロセンサーと傾斜計の計測値の差は最大 2 cm

(X 軸方向) 程度となったことから、本ジャイロセンサーを用いての計測が計測方法として実用可能なレベルであると判断した。

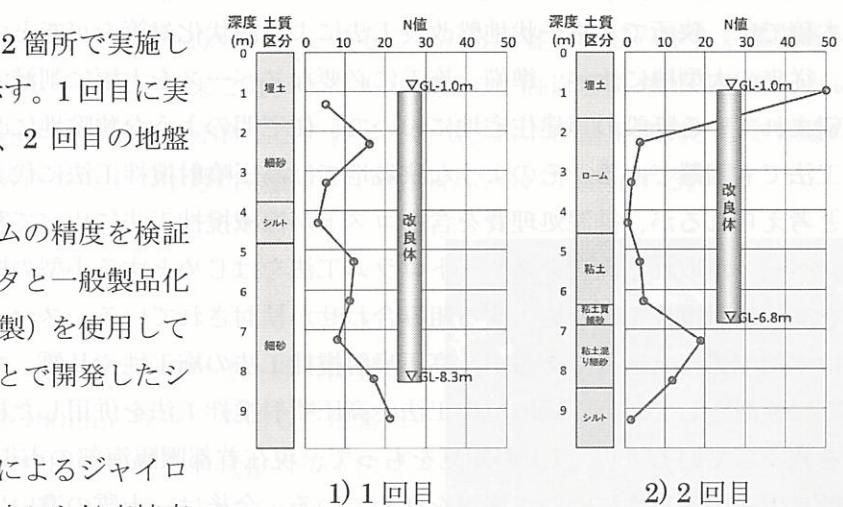


図 10 計測から精度確認の流れ

1) 1回目

2) 2回目

図 11 土質柱状図

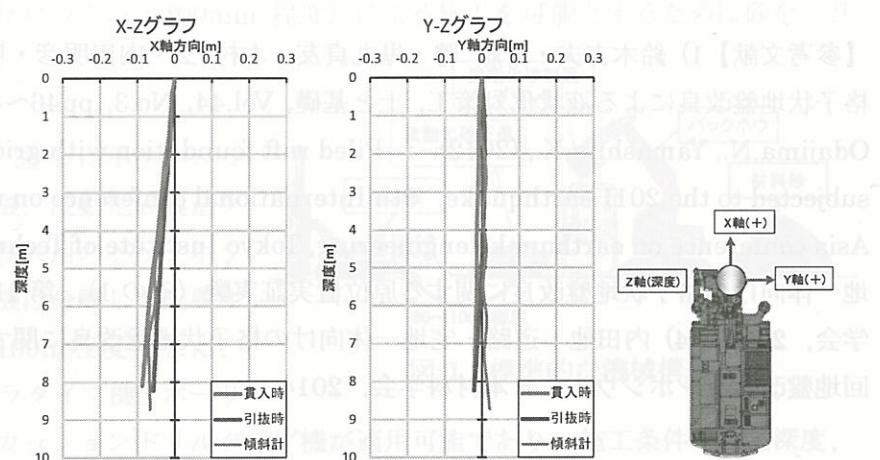


図 12 ジャイロセンサーと傾斜計の結果比較

図13に2回目の施工実験の結果を示す。実験の結果、ジャイロセンサーから無線で変位データを回収でき、作成した打設軌跡管理図より、改良体の鉛直精度を確認することができた。また、その他の杭においても打設直後に、同様のグラフを得られ、鉛直精度を確認することができた。

実験結果より、開発した鉛直精度管理システムを用いることで、改良体施工直後にデータを回収し、打設軌跡管理図を描くことができる。管理図から改良体の鉛直精度を確認できるので、精度が不十分な場合でも再施工などの対策を即時に講じることが可能となり、格子状地盤改良施工時の改良壁の一体性を確実に確保することができるようにになった。

6. 今後の展開

本稿では、狭所でも格子状地盤改良工法による液状化対策を可能とするスマートコラム工法について述べた。従来の大型機に比べ、準備、施工に必要なスペースを大幅に削減することができたが、現在液状化対策が望まれている既設の戸建住宅地において、住宅間のような狭隘地に改良体を施工することはスマートコラム工法でも困難である。そのような狭隘地では高圧噴射搅拌工法に代表される超小型の施工機械が適用できると考えられるが、排泥処理費を含むコストが機械搅拌工法に比べて割高となる。そこで道路部などの比較的スペースが取れる箇所をスマートコラム工法をはじめとする小型の機械搅拌工法で、建物間のような狭隘地を高圧噴射搅拌工法で施工する組み合わせが検討されている。スマートコラム工法の施工性、品質については本稿で述べた通りであるが、高圧噴射搅拌工法の施工性や品質、また両工法の併用時における品質確認も既に検討をしており、機械搅拌工法と高圧噴射搅拌工法を併用した格子状地盤改良の施工が可能であることを確認している³⁾⁴⁾。以上の知見をもって、現在首都圏臨海部の市街地液状化対策事業に対する格子状地盤改良工法の適用性について検討を進めている。今後は、土質の違いによる施工性・品質の確保や、硬質地盤や地中障害物への対応力強化など、さらなる施工対応力の向上を図り、格子状地盤改良工法の適用拡大に努めていく。

【参考文献】1) 鈴木吉夫・斎藤聰・鬼丸貞友・木村玄・内田明彦・奥村良介：深層混合処理工法を用いた格子状地盤改良による液状化対策工、土と基礎、Vol.44, No.3, pp46~48, 1996. 2) Uchida,A., Yamada,T., Odajima,N., Yamashita,K., (2012) : Piled raft foundation with grid-form ground improvement subjected to the 2011 earthquake, 9th International conference on urban earthquake engineering / 4th Asia conference on earthquake engineering, Tokyo Institute of Technology, Tokyo 3) 小西他：道路・宅地一体向けの格子状地盤改良に関する原位置実証実験（その1），第11回地盤改良シンポジウム，日本材料学会，2014. 4) 内田他：道路・宅地一体向けの格子状地盤改良に関する原位置実証実験（その2），第11回地盤改良シンポジウム，日本材料学会，2014.

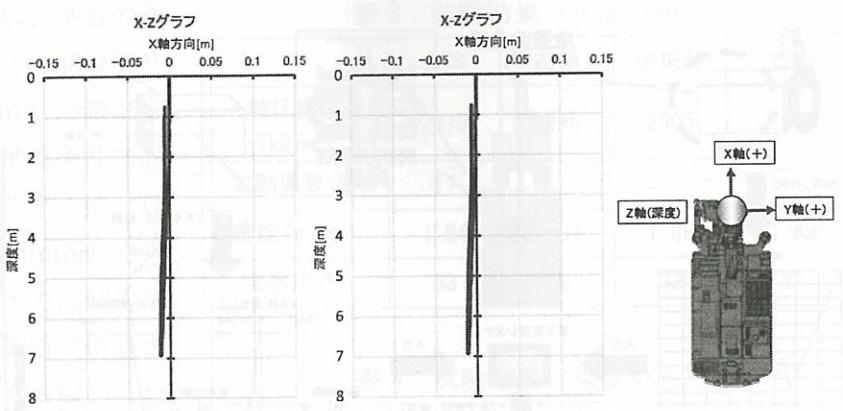


図13 打設軌跡管理図

既設構造物を対象とした締固めによる液状化対策技術

<砂圧入式静的締固め工法 (SAVE-SP 工法) >

(株) 不動テトラ 森鼻 章治・竹内 秀克・杉野 秀一

1. はじめに

海岸堤防や河川堤防は、津波や高潮、洪水から人命や財産を守るために重要な施設であるが、基礎地盤に液状化層が分布することが多く、地震時にこれらの構造物が過大な沈下を来し、本来の性能を確保できなくなることが懸念されている。また、都市域においては、これらの施設の背後まで土地利用されていることが多く、液状化対策を実施するにおいても施工スペースなどの面で非常に厳しい制約条件を受けることが往々にしてある。従来用いられているサンドコンパクションパイル工法（以下、SCP）などのような大型施工機はこのような条件下では適用困難であり、省スペースの施工法が望まれている。既存の省スペース工法としては、薬液注入や高圧噴射工法などが存在するが、一般に非常に高価であり、かつ水際での使用を考えた場合、環境的にも注意が必要となることが多い。加えて河川堤防などにおいては浸透流の阻害などにより、洪水対策上好まれない構造となる場合もある。

砂圧入式静的締固め工法（以下、SAVE-SP 工法）は、流動化剤を添加して流動性を持たせた砂を地盤中に圧入することで地盤の締固めを行う液状化対策工法である¹⁾²⁾。小型施工機であるため狭隘地施工が可能であると同時に、SCP がもつ改良効果の確実性や、砂を母材としていることから地盤となじみやすく環境負荷の小さい工法である。これらの特性を活かし、開発以来 2015 年の 5 月時点で、海岸堤防や河川堤防を中心に約 93 件の施工実績を重ねてきた。本稿では、SAVE-SP 工法の概要と特徴、および適用事例として実績の多い既存の河川堤防と、最近施工を行った供用中の空港滑走路における内容について紹介する。

2. SAVE-SP 工法の要素技術

(1)工法概要

SAVE-SP 工法は、流動化剤を添加して流動性を持たせた砂（流動化砂、写真-1）を小型施工機のロッド（ $\phi 100\text{mm}$ 程度）を通じて地盤内に圧入することにより、緩い砂質地盤の締固めを行う液状化対策工法である。工法名は「Silent Advanced Vibration Erasing—Sand Press」の頭文字より称した。改良原理は、SCP に代表される密度増大による締固めである。従来の締固め工法と大きく異なる点は、小型施工機を用いることで狭隘地施工が可能したこと、小口径ロッド（ $\phi 100\text{mm}$ 程度）による施工を可能とするために砂を一旦流動化砂にすることである。

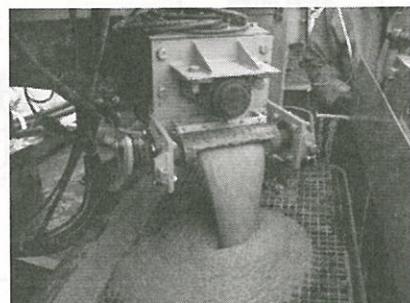


写真-1 流動化砂

(2)機械構成

SAVE-SP 工法の機械構成について、図-1 に示す。ロッドの貫入および引抜きを行う小型施工機、流動化砂製造プラント、流動化砂圧送ポンプ、材料砂投入用のバックホウからなっており、プラントと小型施工機は分離して配置することができる（圧送距離は 80~100m 程度）。また、小型施工機は表-1 に示す超小型クローラタイプ機、ボーリングマシンタイプ機、ロータリーパーカッションドリルタイプ機が適用可能であり、施工条件（施工深度、

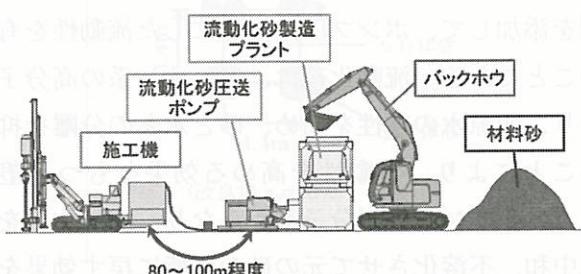


図-1 標準的な機械構成

表-1 小型施工機種別

	①超小型クローラタイプ機	②ボーリングマシンタイプ機	③ロータリーバーカッショントリルタイプ機
適用深度	15.0m(継ぎ無し)	25m 継ぎ施工 3.0m/回	40m 継ぎ施工 1.5m/回
	20.0m(継ぎ 1 回)		
傾斜角度	0°	0~20°	0~60°
姿図			
専有面積(L×W)	6,000mm×3,000mm	2,500mm×1,500mm	5,700mm×2,400mm
機械高(H)	10,500mm	2,500mm	6,000mm
定格出力	97PS(71.3kW)	41PS(30kW)	130PS(96kW)
備考		補助クレーンは施工条件に応じて選定する	地中障害物・捨て石層等の貫入が可能

空頭制限、改良杭の斜角など) や地盤条件 (N 値、地中障害物の有無など) により選定される。

(3) 流動化砂

流動化砂とは、材料となる砂に水、流動化剤、塑性化剤を添加して、ポンプ圧送可能にした流動性を有する砂のことである。流動化剤は、アニオン系の高分子剤からなり、間隙水の粘性を高め、砂と水との分離を抑制することにより、流動性を高める効果をもつ。塑性化剤は、カチオン系の高分子剤からなり、流動化剤を電気的に中和、不溶化させて元の砂の状態に戻す効果をもつ。塑性化剤の効果が発揮されるのは流動化砂製造後約 1か月程度である。

図-2 には流動化砂の状態変化の概要について示す。プラントで製造されてから地盤へ圧入が行われるまでは流動性を有しているが、地盤に圧入されると地盤の拘

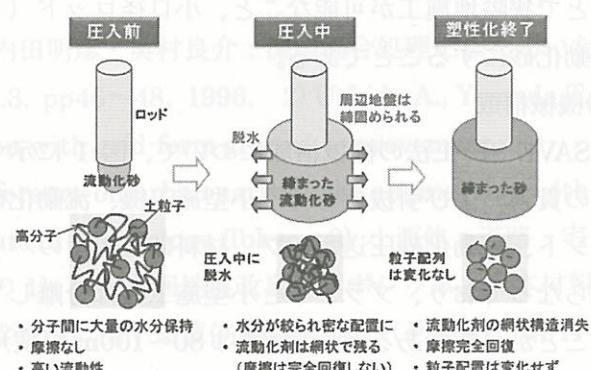


図-2 流動化砂の状態変化

束圧により脱水して流動化砂は密な状態に配置され、概ね流动性は解消される。なお、この時点においては土粒子間には流動化剤が残っており、土粒子間の摩擦はやや小さい状態にあるが、徐々に塑性化剤の効果が発揮され、最終的には流動化剤の効果は消失し、土粒子間の摩擦も完全に回復する。

SAVE-SP 工法に適用される材料砂は、圧送中の流动性を確保するための良好な保水性、および地盤中に圧入された時点での速やかな脱水するための排水性の両面を持った材料が必要となる。従来の SCP の適用実績と比較すると、細砂分を多く含む材料であり、これまでの使用実績では図-3 に示す範囲のものが使用されている。現状では、細粒分含有率 5% 以下、最大粒径 9.5mm 程度以下が目安である。

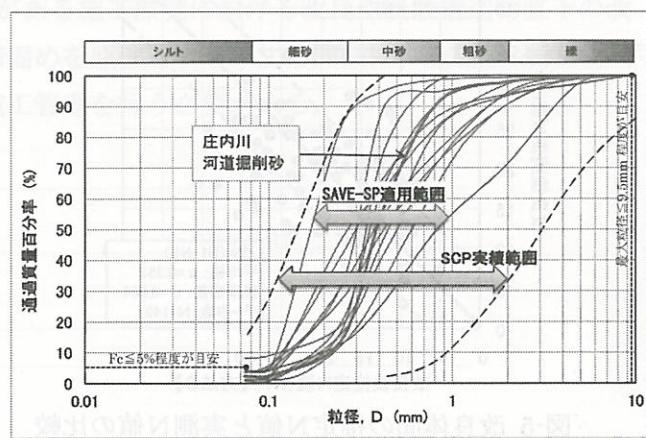


図-3 材料砂の粒度分布

3. SAVE-SP 工法の特徴

SAVE-SP 工法は、平成 26 年 10 月に、一般財団法人 国土技術研究センターにおける「建設技術審査証明事業」にて液状化対策効果、振動・騒音、および施工環境に関する 3 つの開発目標に対し達成を確認されている（技審証第 37 号）³⁾。ここでは、この開発目標に準じ SAVE-SP 工法の特徴を簡単に紹介する。

(1) 液状化対策効果

実工事のデータを用い、SAVE-SP 工法の改良効果を確認した。確認方法としては、改良体間 N 値の増加程度と、従来の SCP で用いられる設計法⁴⁾⁵⁾に基づく推定 N 値を比較した。図-4 には改良体間の改良効果の一例、および図-5 には改良体間の推定 N 値（方法 C, 方法 D, κ 法）と実測 N 値（事前・事後）の比較を示す。これらより、実測データと推定値はほぼ同等であると評価できた。したがって設計に基づく液状化対策効果が得られている事が明らかとなった。あわせて、SAVE-SP 工法の改良体芯 N 値を確認した。図-6 に改良体芯 N 値と改良体間 N 値との比較を示す。これより改良体芯 N 値は改良体間 N 値と同程度以上であった。

以上より、SAVE-SP 工法では「振動式サンドコンパクションパイル工法と同等程度の液状化対策効果が得られること」が確認された。

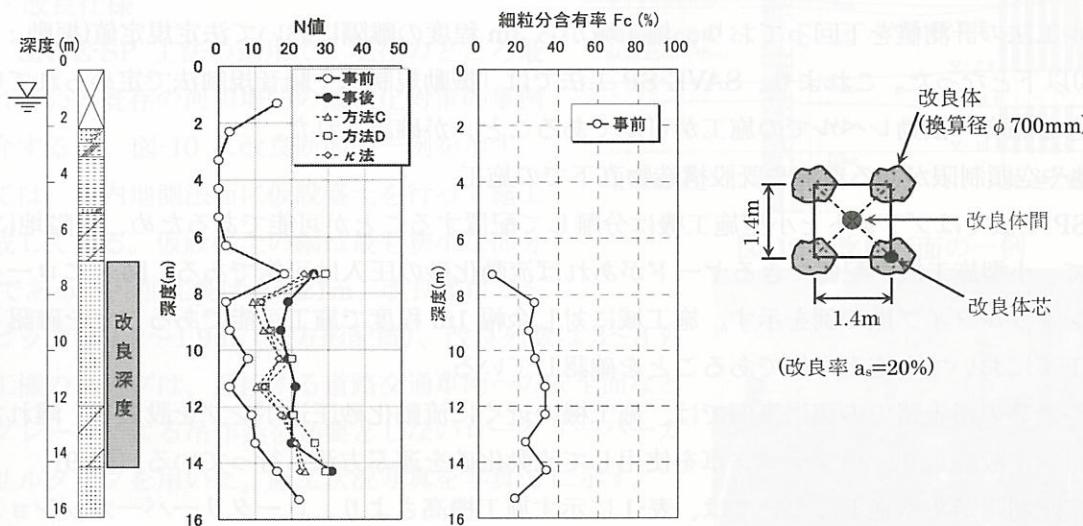


図-4 改良効果の比較（改良体間）

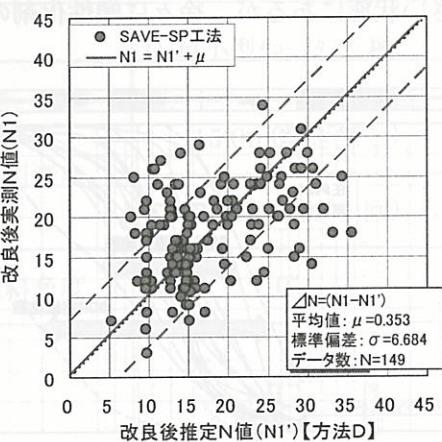


図-5 改良体間の推定N値と実測N値の比較

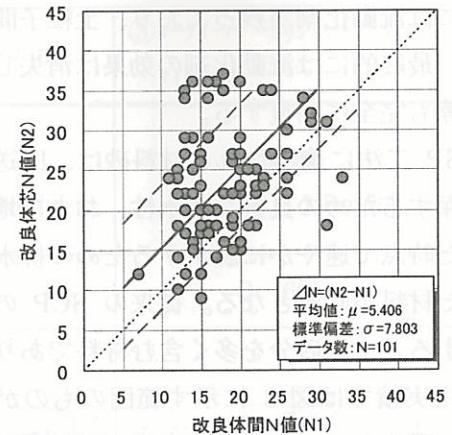


図-6 改良体間N値と改良体芯N値の比較

(2)振動・騒音

SAVE-SP工法の施工中の振動・騒音に関する影響を確認した。図-7に各工事で得られた振動・騒音レベル(dB)と施工機械(プラントおよび施工機)からの距離(m)の関係を示す。同図には、振動規制法および騒音規制法に定められた規制値も記載した。

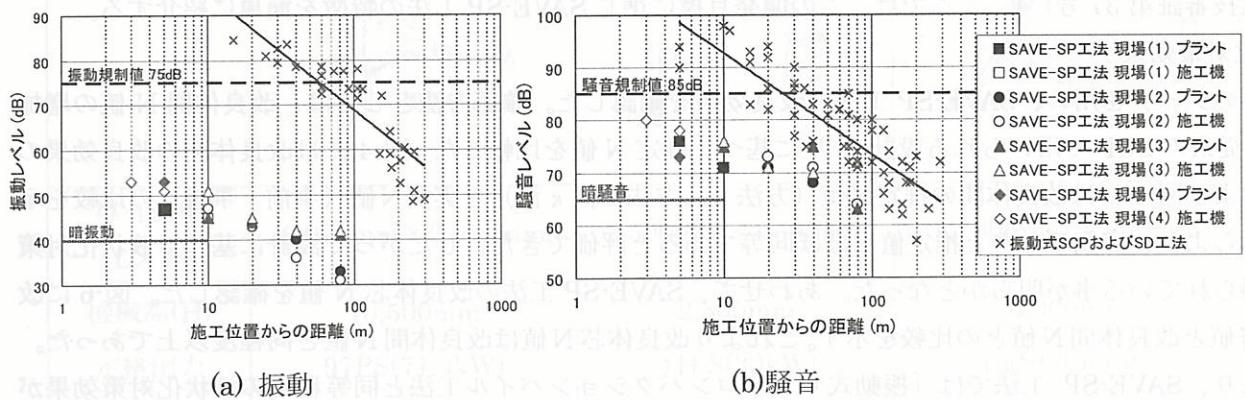


図-7 振動・騒音の距離減衰

図-7より、振動レベル・騒音レベルとも、SAVE-SP工法による計測値において振動式サンドコンパクションパイル工法の計測値を下回っており、施工域から3m程度の離隔において法定規定値(振動：75dB、騒音：85dB)以下となった。これより、SAVE-SP工法では「振動規制法や騒音規制法で定められている規制値を満足できる騒音・振動レベルでの施工が可能であること」が確認された。

(3)狭隘地や空頭制限がある環境や既設構造物直下での施工

SAVE-SP工法ではプラントと小型施工機は分離して配置することが可能であるため、狭隘地における施工について、小型施工機が配置できるヤードがあれば流動化砂の圧入は可能である。図-8にロータリーパーカッションドリルタイプ機の例を示す。施工域に対し余幅1m程度で施工可能であることを確認した。あわせて、実工事においても施工可能であることを確認している。

また、空港等の滑走路での適用事例では、施工機の近くに流動化砂圧送ポンプを設置し、離れた場所に設置したプラント設備より、アジテータ車を使用して流動化砂を運ぶ方法も行っている(図-9)。

次に、空頭制限がある施工については、表-1に示す施工機高さより、ロータリーパーカッションドリルタイプ機で6mでの施工が可能である。また、実工事においても、高架橋の下などの空頭制限のある施工環境における改良を実施している。

さらに既設構造物直下の施工について、実工事より、傾斜施工により海岸堤防・河川堤防・建屋などの既設構造物直下の改良を実施し、所定の液状化対策効果が得られたことを確認している。

以上より、SAVE-SP 工法により「狭隘地や空頭制限がある施工環境における改良や既設構造物直下の改良が可能であること」が確認された。ただし、従来の締固めを原理とする工法と同様に、隆起量および水平変位の発生が確認されるため、変位の影響に留意して施工管理を行う必要がある。

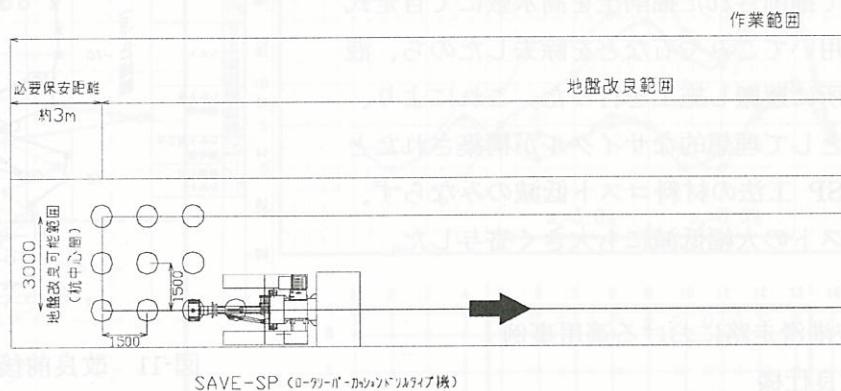


図-8 作業必要範囲(ロータリーパーカッションドリルタイプ機)

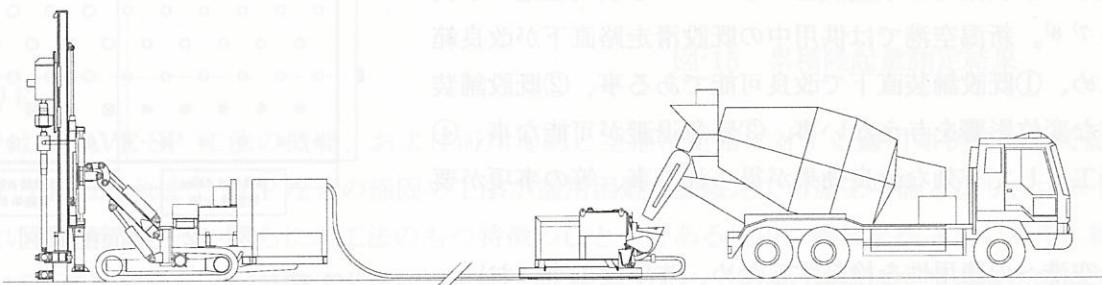


図-9 アジテータ車による流動化砂の運搬・供給 (模式図)

4. SAVE-SP 工法の適用事例

4.1 既存の河川堤防における適用事例

(1)施工条件・改良仕様

ここでは、SAVE-SP 工法の適用で、現在のところ最も多く使われている既存の河川堤防の液状化対策の事例について紹介する⁶⁾。図-10に改良断面の一例を示す。施工に際しては、堤内地側法面に仮設盛土を行って施工ヤードを造成している。仮設盛土の幅は最も狭小な部分で4m程度であった。削孔長は9~21m、改良長は2~14m、改良ピッチは1.2~1.9m（正方形配置）、改良列数は3~8列である。施工機のタイプは、近接する道路交通車両への安全面などを考慮してクレーンによる吊作業を必要としないロータリーパーカッションドリルタイプを用いた。施工状況写真を写真-2に示す。

(2)施工結果

図-11は改良前後のN値の深度分布の一例である。上層から下層まで確実にN値が増加していることが判る。同図には同一箇所で実

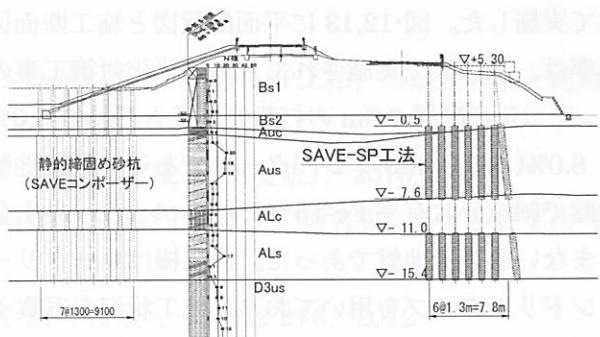


図-10 改良断面の一例



写真-2 施工状況

施された静的締固め砂杭工法（SAVE コンポーザー）の改良効果についても示しているが、改良効果は同等であった。本工事においては、洪水対策として別途実施されている河道掘削工事から発生する掘削土を SAVE-SP 工法の材料として利用した。利用にあたっては、水中ブルドーザーによって掘削された掘削土を高水敷にて自走式ふるい分け機を用いてごみや石などを除去したのち、液状化対策施工箇所に運搬し施工を行った。これにより、資源の有効利用として理想的なサイクルが構築されたとともに、SAVE-SP 工法の材料コスト低減のみならず、掘削土の処分コストの大幅低減にも大きく寄与した。

4.2 供用中の空港滑走路における適用事例

(1)施工条件・改良仕様

次に、供用中の空港滑走路に対する適用について、平成 21 年度より滑走路の液状化対策事業が進められている新潟空港の事例を紹介する^{7) 8)}。新潟空港では供用中の既設滑走路直下が改良範囲となるため、①既設舗装直下で改良可能である事、②既設舗装直下に有害な変位影響を与えない事、③緊急退避が可能な事、④液状化対策工として有効な改良効果が得られる事、等の事項が要求される。

供用中の空港への適用性を検証するため、昨年度工事において SAVE-SP 工法の試験工事を実施した。試験工事は供用中の滑走路脇のショルダ一部の舗装面上で、22m×9m のスペースにて実施した。図-12,13 に平面配置図と施工断面図を示す。置換率は、今まで実施してきた液状化対策工事の実績を踏まえ、正三角形配置 2.0m の打設ピッチとし、 $a_s=5.0\% (\phi 470mm)$ と $8.0\% (\phi 600mm)$ の 2 パターンである。対象地盤は自然堆積地盤で細粒分含有率 $F_c=5\sim 8\%$ とシルト分・粘土分をほとんど含まない砂質土地盤であった。施工機はロータリーパーカッションドリルタイプを用いており、施工状況を写真-3 に示す。

(2)施工結果

改良効果の確認として、施工前後にて標準貫入試験を実施した結果を図-14 に示す。図より流動化砂の圧入による明らかな N 値の増加傾向が見られる。また、図-15 には施工終了後の地表面隆起量の測定結果を示す。結果として二次管理値(23mm)以下の施工が実現でき、既設舗装に有害な影響を与えない事が確認された。供用中の空港では既設滑走路直下の施工を夜間に行うため、舗装面にも過大な変位を与えること無く、日々の空港運用へ支障を来さない事が最も重要となる。したがって、本試験工事の結果より、供用中

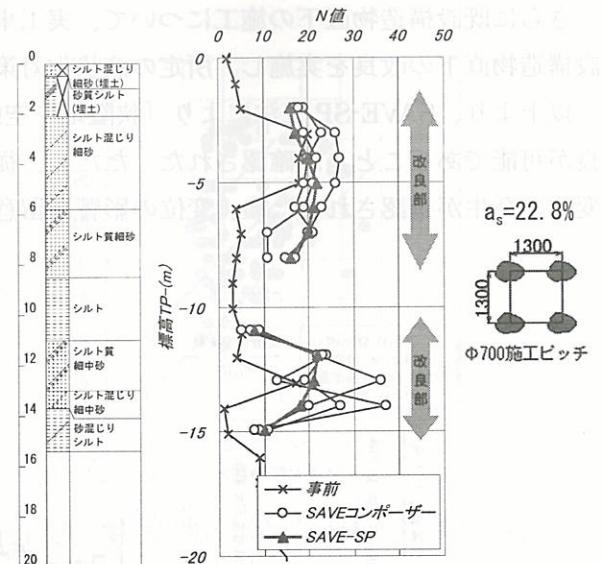


図-11 改良前後の N 値の深度分布

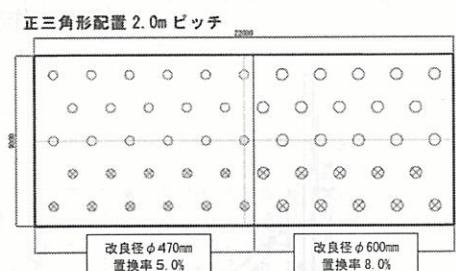


図-12 平面配置図

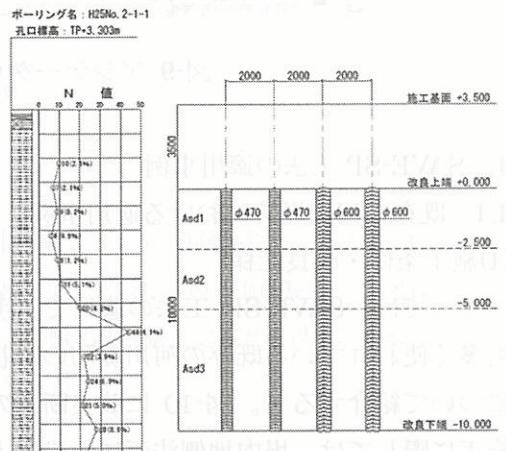


図-13 施工断面図



写真-3 施工状況

の空港滑走路における SAVE-SP 工法の適用性と改良効果が確認検証された。

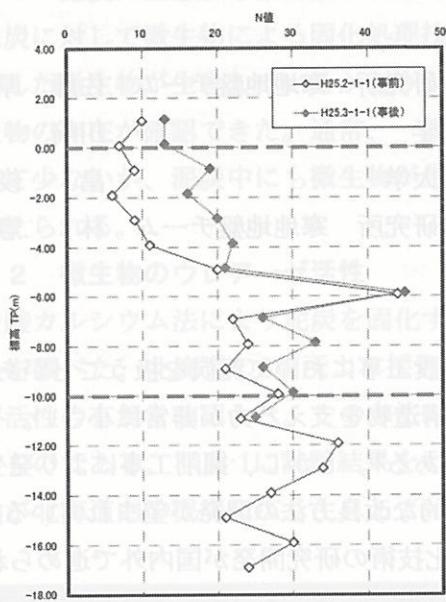


図-14 N 値の深度分布図

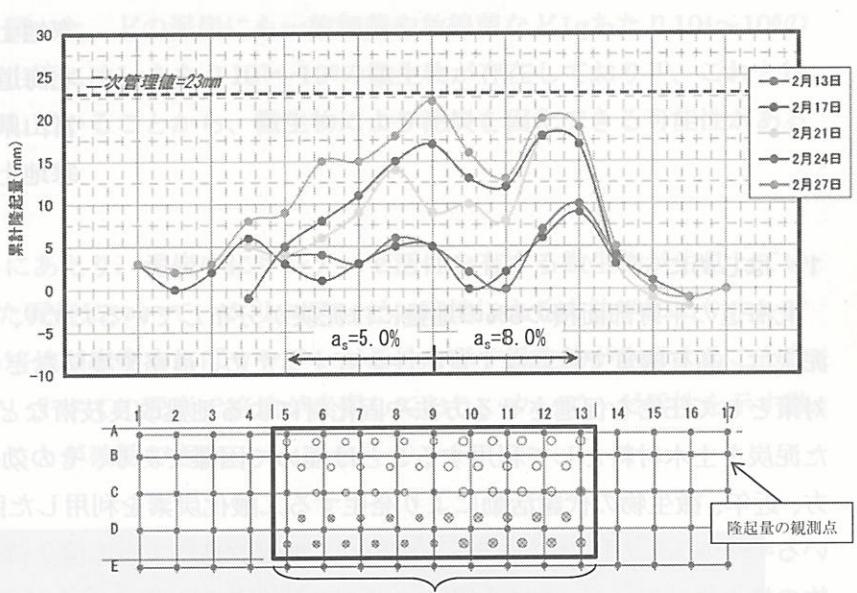


図-15 積累隆起量測定結果

5. おわりに

本稿では、SAVE-SP 工法の概要、および河川堤防と空港滑走路に対する適用事例について紹介した。SAVE-SP 工法はこれまで SCP などの締固め工法が適用困難な狭隘地でも施工可能となり、コスト縮減策としても大いに期待できる。さらに本工法のもつ特徴のひとつである地中に異物を残さない点や、粒度分布が適合すれば河道掘削砂など現地発生土が利用可能であることなど、今後の狭隘地や既設構造物直下における液状化対策に新たな可能性を切り開く技術と考える。

【参考文献】

- 1) 今井優輝, 大林淳, 福島信吾, 伊藤竹史: 砂圧入式静的締固め工法 (SAVE-SP工法) の改良効果と適用事例, 第54回地盤工学シンポジウム発表論文集, pp.579-584, 2009.10
- 2) SAVE-SP 工法研究会 : SAVE-SP 工法 設計・施工マニュアル (平成 25 年度版), 2013.5.
- 3) 一般財団法人国土技術研究センター : 建設技術審査証明事業 (一般土木工法) 報告書 SAVE-SP工法 (砂圧入式静的締固め工法), 2014.10
- 4) (社)日本道路協会 : 道路土工軟弱地盤対策工指針 (平成 24 年度版), pp.272-276, 2012
- 5) (社)日本港湾協会 : 港湾の施設の技術上の基準・同解説 (下巻), pp.721-727, 2007.
- 6) 鵜野雅明, 竹内秀克, 久保陽太郎, 中出雄也 : 庄内川河川堤防における砂圧入式静的締固め工法の適用事例, 第48回地盤工学研究発表会, pp.931-932, 2013.7
- 7) 鈴木亮彦, 伊藤竹史, 高山英作: 嶋しい施工条件下でも対応可能な液状化対策技術 -SAVE-SP工法-, 北陸地方建設事業推進協議会 平成26年度建設技術報告会, 2014.8
- 8) 高山英作, 梅木洋人, 高橋伸一, 内生藏一樹: 供用中の空港における砂圧入式静的締固め工法の適用事例, 第50回地盤工学研究発表会, pp.1879-1880, 2015.9

微生物による泥炭固化の可能性について

寒地土木研究所 寒地地盤チーム 佐藤 厚子
北海道大学 川崎 了
富山県立大学 畠 俊郎
寒地土木研究所 寒地地盤チーム 林 憲裕

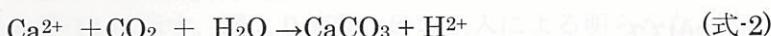
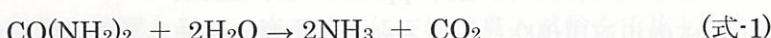
1. はじめに

北海道の平野部面積の6%の地盤には泥炭が分布しているため¹⁾、建設工事において泥炭を扱うことがある。泥炭は、高有機質で軟弱な土質特性を有するため、道路や堤防などの構造物を支える力が非常に小さい。その対策として圧密を促進させる方法や固化材による地盤改良技術などがある²⁾。しかし、掘削工事により発生した泥炭を土木材料として利用することは極めて困難であり、その効率的な改良方法の開発が望まれている。一方、近年、微生物の代謝活動により発生する二酸化炭素を利用した固化技術の研究開発が国内外で進められている^{3) 4) 5) 6)}。この技術の泥炭への適用は、地盤改良による環境負荷の低減に資することから、筆者らは、微生物の持つウレアーゼ活性を利用して地盤の固化処理技術による泥炭の固化実験に取り組んできた⁷⁾。その結果、半年の養生で運搬可能な強度(50kN/m²)⁸⁾が得られた。また、泥炭固化の程度について、電気伝導度を指標として判断する方法⁹⁾に着目して検討を実施した。本文はこれらをまとめたものである。

2. 微生物の代謝を利用した固化の原理

微生物の代謝活動を利用した固化改良技術には、炭酸カルシウム法⁵⁾、シリカ法⁶⁾などがある。本実験では、炭酸カルシウム法による微生物固化を行った。炭酸カルシウム法は、微生物の代謝により発生する二酸化炭素と土の間隙中のカルシウム源とが反応し析出する炭酸カルシウムにより、地盤を固化させる技術である。炭酸カルシウムは析出する際に土粒子同士を結合させる働きがあり、土の強度が増加する¹⁰⁾。

炭酸カルシウム法により地盤を固化させる場合、pH上昇と二酸化炭素を供給するために尿素を、またカルシウム源としてカルシウム化合物を投入する。炭酸カルシウム法の反応メカニズムは、次のとおりである。微生物が尿素($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$)を加水分解して、アンモニア(NH_3)と二酸化炭素(CO_2)を生成する。この二酸化炭素(CO_2)と対象土砂の間隙水中のカルシウムイオン(Ca^{2+})の反応により炭酸カルシウム(CaCO_3)が析出される。ウレアーゼは、尿素の加水分解の反応速度を高める酵素である。泥炭中にウレアーゼ活性を有する微生物が生息していれば、尿素の加水分解が速くなり多くの CO_2 が生成され、炭酸カルシウムの析出量が多くなる。ウレアーゼ活性は、微生物を利用した固化に大きく影響を及ぼすといえる。



Sato Atsuko	北海道札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34	Tel 011-841-1709 Fax 011-841-7333
Kawasaki Satoru	北海道札幌市北区北8条西5丁目	Tel 011-716-2111(代)
Hata Toshiro	富山県射水市黒河5180	Tel 0766-56-7500(代)
Hayashi Toshihiro	北海道札幌市豊平区平岸1条3丁目1-34	Tel 011-841-1709 Fax 011-841-7333

3. 泥炭の性質

3. 1 泥炭に生息する微生物

泥炭に対して微生物による固化処理技術を適用するため、北海道内の代表的な3種類の泥炭に関して固化に適した微生物が生息しているかどうかを調べた。どの泥炭にも一般細菌や放線菌など1gあたり $10^4\sim10^6$ の微生物の存在が確認できた。通常、一般的な土壌には1gあたり $10^7\sim10^9$ の微生物が存在しており¹¹⁾、これと比較して少ないが、泥炭中にも微生物が生息していることから、微生物により泥炭を固化できる可能性があると考えられる。

3. 2 微生物のウレアーゼ活性

炭酸カルシウム法により泥炭を固化するにあたり、泥炭中にウレアーゼ活性を有する微生物が生息しているかを調べた。北海道の8箇所より採取した泥炭について、クリステンゼン培地による方法¹²⁾によりウレアーゼ活性の有無を確認した。この方法は、培地が赤変すればウレアーゼ活性を示す微生物が生息することを示すものである。写真-1に試験結果を示す。すべての泥炭で培地が赤変しており、ウレアーゼ活性を示す微生物が北海道内の泥炭に広く生息していることが確認できた。

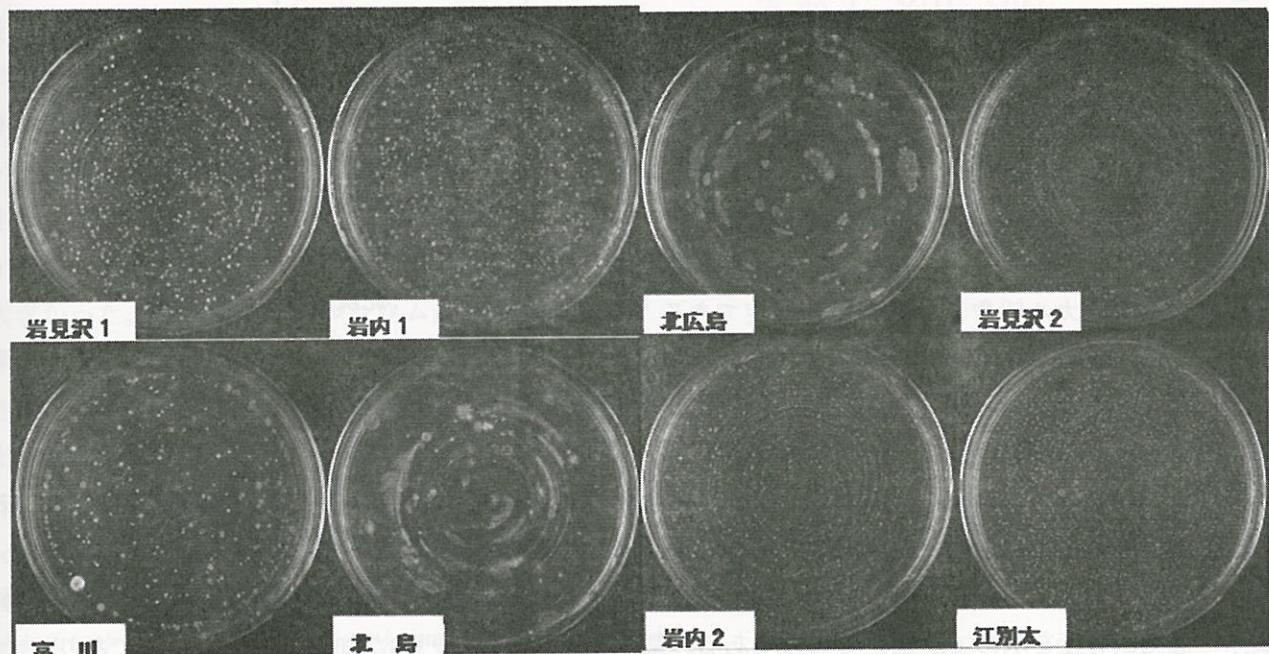


写真-1 ウレアーゼ活性試験結果

4. 実験方法

泥炭の固化実験および電気伝導度によるウレアーゼ活性の推定は、表-1に示す泥炭に対して行った。

4. 1 炭酸カルシウム法による固化改良の方法

微生物による固化実験は江別太泥炭について行った。これまでの固化実験^{13) 14)}では、泥炭の含水比が一般的な土砂と比較して非常に高かったため、発現強度は小さいという結果が得られている。このため、自然乾燥により含水比を336%まで低下

表-1 泥炭の基本物性値

固化実験	○	○	○
ウレアーゼ活性推定	○	○	○
試料名（採取地）	岩内	江別太	富川
含水比 (%)	1028.64	545.92	119.55
土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	1.557	1.895	2.206
強熱減量 L _i (%)	93.813	56.653	39.007
pH	4.5	4.1	2.5

させたのち炭酸カルシウム法を適用した。泥炭 1.5kg に対して、尿素と塩化カルシウムを混合して、表-2 に示す配合で実験を行った。尿素は泥炭中に含まれる水分量の 1/10、塩化カルシウムは尿素量の 2 倍とした⁷⁾。微生物による固化では、pH が中性域～弱アルカリ性域の場合にその効果が良好であるとされている¹⁵⁾。塩化カルシウムの混合量が多くなることにより、pH が酸性となることから、pH を中性域～弱アルカリ性に調整するため、重曹を混合した。また、尿素分解をより促進するために、ナタマメ由来のウレアーゼを混合した配合でも実験を実施した。

各配合について、地盤工学会安定処理土の締固めをしない供試体作製方法¹⁶⁾により、直径 5cm、高さ 10cm の供試体を作製し、20°C の恒温恒湿室で 4 か月養生した。供試体作製から 1 か月後、4 か月後に、一軸圧縮強さと炭酸カルシウム析出量（二酸化炭素のガス圧（以降「ガス圧」と称する））を測定した。すなわち、（式-3）に示すように、炭酸カルシウムが塩酸によって溶解すると、塩化カルシウムと二酸化炭素ガスを発生する。このときのガス圧を測定することにより、炭酸カルシウムの含有量を推定できる¹⁷⁾。

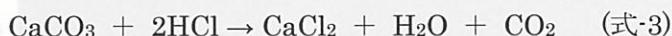


図-1 に炭酸カルシウム法による泥炭固化試験の流れを示す。

4. 2 電気伝導度によるウレアーゼ活性の評価

泥炭のウレアーゼ活性の程度を評価する方法は、微生物の尿素加水分解速度を求める方法⁹⁾に準拠し、所定の培地で液体培養した微生物に尿素溶液を混合した液体の電気伝導度を測定することにより行うものである。この方法は、土砂の中から固化が可能な微生物を単離した後に、液体培養した微生物と尿素溶液を混合した液体の電気伝導度を求めて評価するものである。微生物の単離は専門的な知識と技術が必要であり、土木材料として地盤を改良するための作業としては、あまり実用的ではない。このため、本実験では、泥炭から微生物を単離しないで、自然の泥炭を検体とした。また、電気伝導度の測定は、菌体の培養液 10ml と尿素溶液 40ml を混合するが、泥炭の場合は高含水であることから、土砂量と培養液の量は同じとして、写真-2 に示すように泥炭 10g と尿素溶液 40ml と混合して懸濁状態にして電気伝導度を測定した。図-2 に尿素加水分解速度の測定手順を示す。

5. 試験結果

5. 1 炭酸カルシウム法による固化改良の結果

各供試体を作製してから、1 か月、4 か月後の一軸圧縮強さを図-3 に示す。一軸圧縮強さは 2 供試体の平均値である。全ての配合について、供試体作製時には自立しなかった。また、

表-2 固化実験の配合

	尿素 CO(NH ₂) ₂	塩化カルシウム CaCl ₂	重曹 NaHCO ₃	ウレアーゼ
①	116	232	-	-
②	-	-	-	-
③	116	232	20	-
④	116	232	20	3.5

<作業項目>

泥炭(江別太)採取

自然含水比、pH
土粒子密度、強熱減量

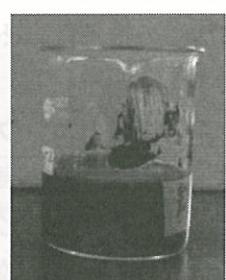
室内にて自然乾燥に
より含水比低下

含水比

炭酸カルシウム法
(養生)

1 か月後、4 か月後
一軸圧縮強さ
含水比、pH
カルシウム含有量

図-1 炭酸カルシウム法による
泥炭固化試験の流れ



a. 泥炭

b. 尿素溶液と混合後

写真-2 試料の状況

①、②、③の泥炭に生息する微生物のみによる配合では、1か月後と4か月後の一軸圧縮強さは非常に小さく、強度に変化はなかった。しかし、ウレアーゼを混合した④では、一軸圧縮強さが1か月後で 25kN/m^2 、4か月後で 53kN/m^2 となり、ウレアーゼを混合することにより強度が発現し、さらに時間が経過することによって強度が増加することを確認した。微生物を利用することにより運搬可能な強度(50kN/m^2)⁸⁾まで改良することができた。これより、泥炭中の微生物が活性化して尿素を加水分解し、炭酸カルシウムの析出を促進することができれば、泥炭を固化できる可能性があるといえる。

次に、微生物の反応で発生したガス圧と一軸圧縮強さの関係を図-4に示す。ガス圧は、一軸圧縮強さを測定した供試体のうちの1供試体から採取した2つの試料について測定し平均したものである。供試体作製時にはガスは発生しなかったが、各配合で、1か月および4か月経過後の供試体においてガス圧が生じ、炭酸カルシウムが析出したと考えられる。1か月後、4か月後に強度発現した④では、ガス圧が大きかった。図-5に炭酸カルシウム量とガス圧の関係⁷⁾を示す。④の供試体では、10gの試料中に1か月後で0.9g、4か月後で1.1gの炭酸カルシウムが析出されたと推察される。

5. 2 電気伝導度によるウレアーゼ活性の評価

尿素溶液混合後の経過時間と電気伝導度の増加量の関係を図-6に示す。経過時間に対する電気伝導度の増加量が大きいと、ウレアーゼ活性が大きいと判断できる。経過時間に対する電気伝導度の増加量は、岩内、江別太では小さいことから、ウレアーゼ活性が小さいと考えられる。しかし、富川ではこれらよりは大きい。このことから、泥炭の種類によってウレアーゼ活性の程度が異なると考えられる。この3種類の泥炭について、ウレアーゼ活性の程度と表-1の物性値と比較した。含水比、土粒子密度、強熱減量、pHなどの物性値とウレアーゼ活性の程度には明確な関係がないように見える。今後データを増やし確認したい。

図-6には、陸域由来の微生物で地盤強度増加効果が明らかになっており国内外で広く利用されている *Bacillus pasteurii* と、海域由来でウレアーゼ活性を持ち今後の微生物固化が期待されている *Sporosarcina aquimarina* のデータ⁸⁾をあわせて示している。富川の電気伝導

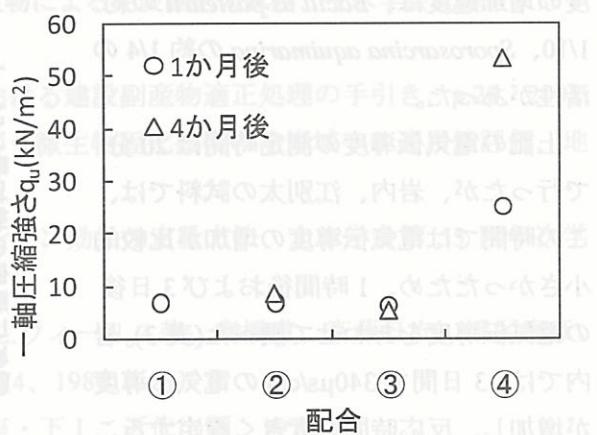


図-3 各配合の一軸圧縮強さ

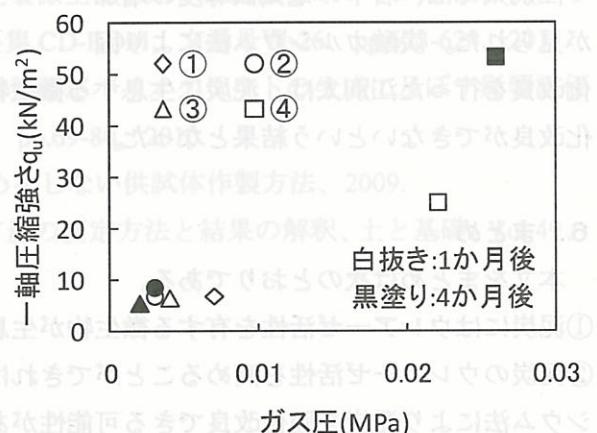


図-4 ガス圧と一軸圧縮強さ

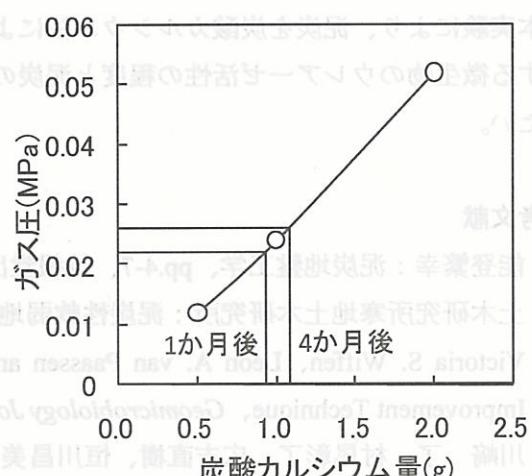


図-5 炭酸カルシウム量とガス圧の関係

度の増加速度は、*Bacillus pasteurii* の約 1/10、*Sporosarcina aquimarina* の約 1/4 の活性があった。

上記の電気伝導度の測定時間は 20 分で行ったが、岩内、江別太の試料では、この時間では電気伝導度の増加が比較的小さかったため、1 時間後および 3 日後の電気伝導度をあわせて調べた(表-3)。岩内では、3 日間で $340 \mu\text{s}/\text{cm}$ の電気伝導度が増加し、反応時間を大きく設定することができれば、微生物の代謝活動を利用した固化が可能であると考えられる。

江別太では、若干の電気伝導度の増加が見られた。炭酸カルシウム法により固化改良を行った江別太は、泥炭に生息する微生物のみでは固化改良ができないという結果となった。

6. まとめ

本文をまとめは次のとおりである。

- ①泥炭にはウレアーゼ活性を有する微生物が生息する。
- ②泥炭のウレアーゼ活性を高めることができれば、炭酸カルシウム法により泥炭を固化改良できる可能性がある。
- ③泥炭に生息する微生物を単離することなく、電気伝導度によりウレアーゼ活性の程度を評価できる。

7. おわりに

本実験により、泥炭を炭酸カルシウム法により固化改良できる可能性が明らかとなった。今後、泥炭に生息する微生物のウレアーゼ活性の程度と泥炭の物性値、ウレアーゼ活性の程度と強度などの関係を明らかにしたい。

参考文献

- 1) 能登繁幸：泥炭地盤工学、pp.4-7、技報堂出版 1991.
- 2) 土木研究所寒地土木研究所：泥炭性軟弱地盤対策工マニュアル、2011.
- 3) Victoria S. Wiffen, Leon A. van Paassen and Marien P. Harkes : Microbial Carbonate Precipitation as a Soil Improvement Technique、*Geomicrobiology Journal*、24、pp. 417-423、2007.
- 4) 川崎 了、村尾彰了、広吉直樹、恒川昌美、金子勝比古：微生物の代謝活動により固化する新しいグラウトに関する基礎的研究、応用地質、Vol.47、No.1、pp.2-12、2006.
- 5) 寺島 麗、島田俊介、小山忠雄、川崎 了：微生物に代謝により固化するシリカ系地盤注入材バイオグラウトの基礎研究、土木学会論文集 C、Vol.65、No.1、pp.120-130、2009.
- 6) 畠 俊郎、桑野玲子、阿部廣史：微生物機能を用いた原位置透水性制御手法に関する基礎的研究、土木学会論文集 G、Vol.64、No.1、pp.168-176、2008.

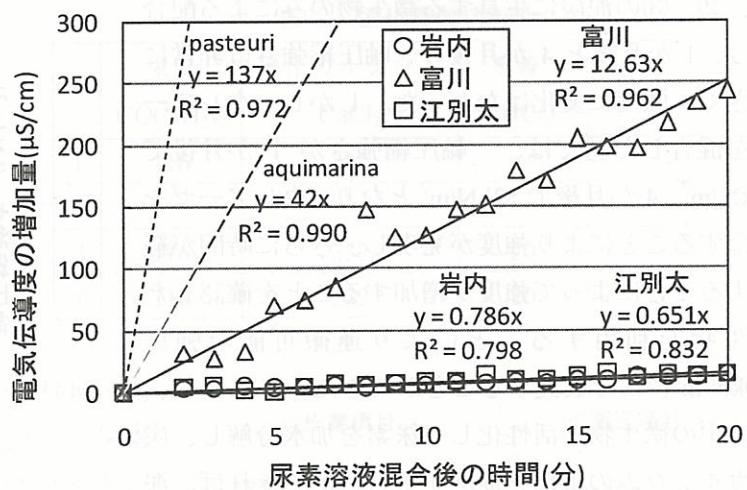


図-6 尿素混合後の時間と電気伝導度の増加量

表-3 混合後の時間と電気伝導度 ($\mu\text{s}/\text{cm}$)

試料名	岩内	江別太	富川
直後	348	29	832
1時間後	388	42	-
3日後	686	85	-

- 7) 佐藤厚子、川崎 了、畠 俊郎、山梨高裕、鈴木輝之：微生物による泥炭固化の試み、土木学会北海道支部平成 25 年度論文報告集第 70 号、2014.2.
- 8) 北海道開発局事業振興部 技術管理課：北海道開発局における建設副産物適正処理の手引き、p.20、2008.
- 9) 畠 俊郎、横山珠美、阿部廣史：尿素加水分解速度に基づく微生物固化技術の沿岸域への適用性評価、地盤工学ジャーナル Vol.8、No.4、pp.505-515、2013.10
- 10) 福江正治、中村隆昭：炭酸カルシウムによるセメントーション効果の定量方法、土木学会第 53 回年次学術講演会、pp.88-89、1998.
- 11) T.Y.スエタニ、E.A.エーデルバーグ、J.L.イングラム、M.L.ウェーリス著、高橋甫、斎藤日向、手塚泰彦、水島昭二、山口英世訳：微生物学入門編、培風館、pp.67-74、1980.
- 12) 坂崎利一、吉崎悦郎、三木寛二 著：新 細菌培地学講座・下 I、近代出版、1978.
- 13) 有山萌奈、川崎 了、佐藤厚子、畠 俊郎：泥炭のバイオ固化処理に関する基礎的研究、資源・素材学会北海道支部平成 23 年度春季講演会、pp.53-54、2011.
- 14) 野本侑里、畠 俊郎、川崎 了、佐藤厚子：泥炭由来の土壤微生物を用いた炭酸カルシウム析出に関する検討、平成 23 年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集 CD-ROM、文番号VII-26、pp.623-624、2011.
- 15) 棚木俊文、吉永智昭、川崎 了：異なる pH および有機栄養源がバイオグラウトの生成に及ぼす影響評価に関する基礎的研究、地盤工学ジャーナル Vol. 5、No. 1、pp.69-80、2010.
- 16) 地盤工学会：土質試験の方法と解説、安定処理土の締固めをしない供試体作製方法、2009.
- 17) 福江正治、加藤義久、中村隆昭、森山 登：土の炭酸塩含有量の測定方法と結果の解釈、土と基礎、Vol.49、No.2、pp.9-12、2001.

