

17. 複合相対攪拌工法の施工環境への適応とその事例

エポコラム協会
小野田ケミコ株式会社
中央大学理工学部

○ 木寺 智則
西尾 経
齋藤 邦夫

1. はじめに

地盤改良工事における基本的要件は「品質」,「工期」,「工費」を適切にバランスさせることである。

これを実現するためには工事予定箇所の施工環境を適切に把握し,最も相応しいと考えられる工法を選択することが,工事の効率=生産性に大きく寄与するものと考えられる。

施工環境を地盤環境と工事環境に二分し,それぞれにおける要因とリスクを分析すると表-1 のように整理できる。

すなわち,工事環境は施工の効率と周辺に及ぼす影響に強く関連し,特に都市域における工事では地盤改良に伴う地盤変状,つまり盛上りや水平変位の発生の抑制が大きな課題である。また地盤環境は,工事環境と異なり事前に十分な情報収集することが難しく,結果として改良体が工事仕様 に合致しなかったり,極端な場合には施工不能と云う事態もあり,施工に際して十分配慮することが必要である。

そこで本稿では,複合相対攪拌工法の概要を述べ,施工環境に対する適用性として改良困難地盤に対する施工事例ならびに低変位施工に関する取り組みと実績について紹介する。

2. 複合相対攪拌工法の概要

複合相対攪拌工法の攪拌翼構造と回転方向を図-1 に示す。同図より,攪拌翼は,籠状外翼(A)3枚,籠状中翼(B)・芯翼(C)各2枚と先端に装着された削孔ヘッド(D)により構成されている。

削孔ヘッド(D)と中翼(B)は右方向に正回転し,外翼(A)と水平版状の芯翼(C)がこれと逆回転することにより「共回り」,「連れ回り」現象が抑制できる特徴を有している¹⁾。

さらに,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,従来工法に比べて約3倍の能力を有する。

また,本工法は,それぞれが持つ特徴で4つに分類されている。

その仕様と攪拌翼径を表-2 に示す。まず,開発当初の複合相対攪拌工法は,攪拌翼径が最大φ1.6m,改良断面積 $A=2.01\text{m}^2$ の標準型と,高トルク

表-1 施工環境

	要 因	リスク
1) 工事環境	・作業空間(上空制限など) ・近接構造物	・地盤盛上り ・側方変位
2) 地盤環境	・転石等異物混入 ・中間層の存在 ・残置物(PC 杭、ドレーン材等)	・出来形 ・改良工事不能

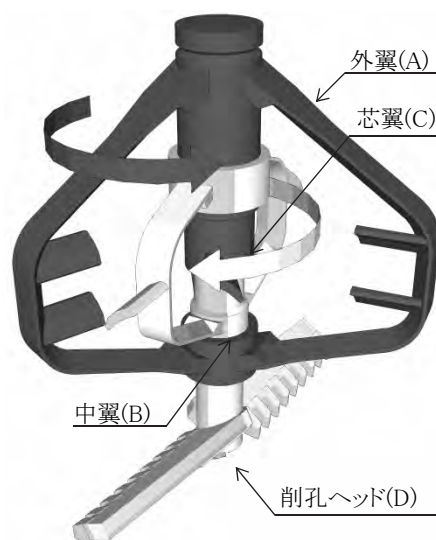


図-1 複合相対攪拌翼の構成

表-2 複合相対攪拌工法の仕様区分と攪拌翼径

仕様区分	摘要	攪拌翼径
複合相対攪拌工法	標準	φ0.8m～φ1.6m
	硬質地盤対応	φ1.5m～φ1.6m
Loto 工法	大口径	φ1.8m～φ2.5m
Taf 工法	超硬質地盤対応	φ1.5m～φ1.6m
	地中残存物処理	φ1.5m～φ2.5m
Pls 工法	低変位	φ1.5m～φ2.5m

化して開発された硬質地盤対応型がある。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φ1.8～2.5m,改良断面積 $A=2.55\sim4.91\text{m}^2$ に大口径化した機種がLoto 工法である。また,掘削性能の大幅な向上を図るため新機軸の先端ヘッドを装着し,転石や既製杭等の地中残存物地盤に対してφ1.5～2.5mの改良体の築造が可能な機種がTaf 工法である。

さらに,攪拌翼の回転軸をスパイラルロッドに仕様変更し,これと施工時の注入圧力によって原土の排出を促して改良体造成中に生じる地盤変位を効果的に抑制する機種がPls 工法である。

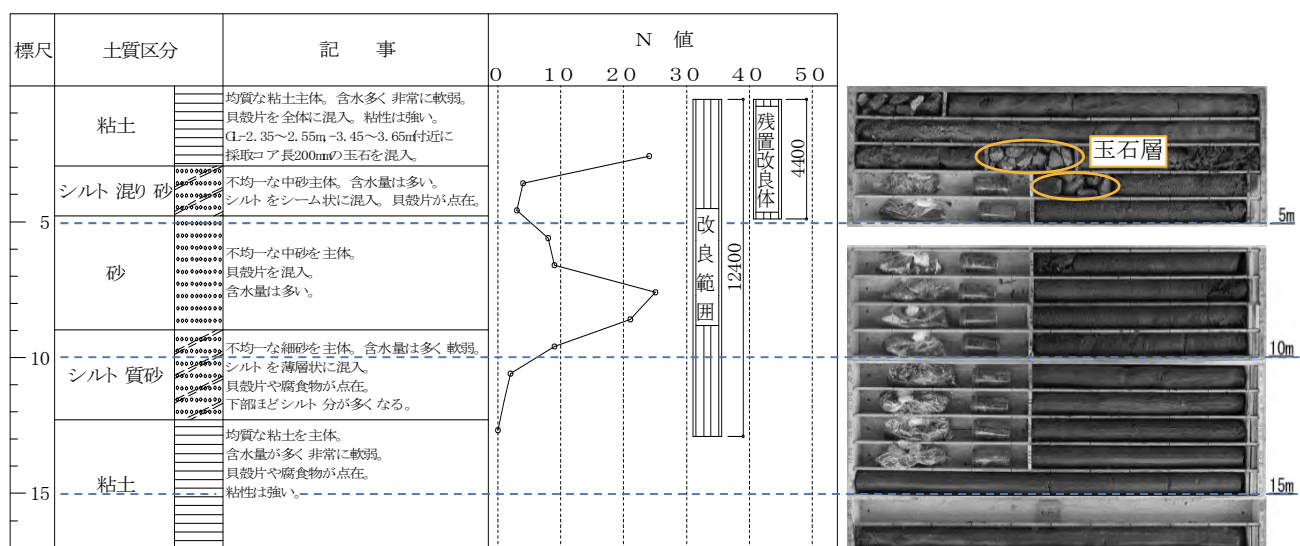


図-2 土質柱状図および残置地盤改良杭体の深度位置

写真-1 対象地盤の玉石混じりコア状況

3. 地盤改良困難要因が複合する地盤の施工事例²⁾

3.1 工事概要

樋門の建設に際し、基礎の沈下抑止と液状化対策を目的に一般的なスラリー式攪拌工法が採用された。しかしながら、地盤改良域内には旧施設の樋管、張コンクリート・石積み等の障害物、さらには粒径 200mm の玉石が分布する粘土層さらに $N > 20$ の層厚 2~3m の砂質中間層が存在する地盤改良困難層であった。このため、従来施工機では改良途中で貫入不能となり、深さ 4.4m 付近で地盤改良杭体に高止まりが生じた。

このような施工トラブルを解消し、当初の改良目的を達成するためには、i) 地中障害物、ii) $N > 20$ の中間層に加え、新たに iii) 高止まった地盤改良杭体等の諸課題を克服する施工方法を検討する必要性が生じた。特に残置された地盤改良杭体は直径 $\phi 1.6\text{m}$ × 長さ 4.4m ほどであり、しかも詳細は後述するが、平均的な固結化した強度は $q_{uf}=2,400\text{kN/m}^2$ と高強度化している。

係る状況から、複合する改良阻害要因を克服して設計仕様に合致した改良体を造成する高い機能性を有する施工方法が検討された。その結果、高トルクで削孔能力に優れ、既に多くの改良困難地盤に施工実績を有する Taf 工法の機動性が着目されて選定されることとなった。なお、本工法の適用に際し、その改良径が当初の改良径と同等径 ($\phi 1.6\text{m}$) であるため、改良杭配置を変更する必要はないと判断した。

3.2 地盤条件

図-2 は、Taf 工法が対象とした地盤条件である。表層約 3m は非常に軟弱な粘土層で下層部には玉石が混在している。これに N 値の分布が不均一で、特に GL-7m~9m の部分に $N > 20$ の締まった砂層が続く。さらにその下部には極めて軟弱な粘土層が 25m に亘って堆積している。また、写真-1 は、

採取した試料の状況を示す。約 GL-3m の粘土層内には、玉石層が認められる。

施工不能で残置された $\phi 1.6\text{m}$ の地盤改良杭体は、図-2 に示す土質柱状図の右側に示すように中間砂層上部に位置している。今回の施工課題の一つが Taf 工法により、これらを破碎・粉砕し、高止まった地盤改良杭体の当初計画位置に本来の改良体を新たに造成することにある。

図-3 は地盤改良体造成敷地 (46.3m × 35.8m) 内に計画された改良体の伏図である。同図には、旧構造物由来の残留物が懸念される領域、既往工法で造成した改良体ならびに高止りして残置された地盤改良杭体の位置、Taf 工法により計画された改良体位置情報が示されている。特に図中に示す● (塗りつぶし丸印 (●) の白抜き△) 位置は、Taf 工法による改良体造成位置と高止まりした地盤改良杭体がラップする場合である。一方、● (塗りつぶし丸印 (●)) 位置は、地中障害物が想定される範囲にあって、Taf 改良体と高止まりした地盤改良杭体が重なる場合を表わしている。それぞれの条件に該当する本数は、前者が 11 本、後者が 13 本である。

3.3 施工結果と改良品質

写真-2 は、Taf 工法により高止りした残置地盤改良杭体を破碎・粉砕し、混合攪拌を同時施工したときの状況である。先にも指摘したように同地盤改良杭体の設計基準強度は $q_{uck}=800\text{kN/m}^2$ であるが、採取深さに対する試料の強度は、表-3 のような結果が得られている。すなわち、上層部の強度が他に比べて大きな傾向を示すが、深さ 4.4m の範囲における平均強度はおおよそ $q_{uf}=2,420\text{kN/m}^2$ である。このような高強度は地盤改良杭体施工からの材齢が 1 ヶ月を経過していることも要因の一つと考えられる。いずれにせよ、このような高強度の地盤改良杭体を Taf 工法により、先ず破碎粉砕

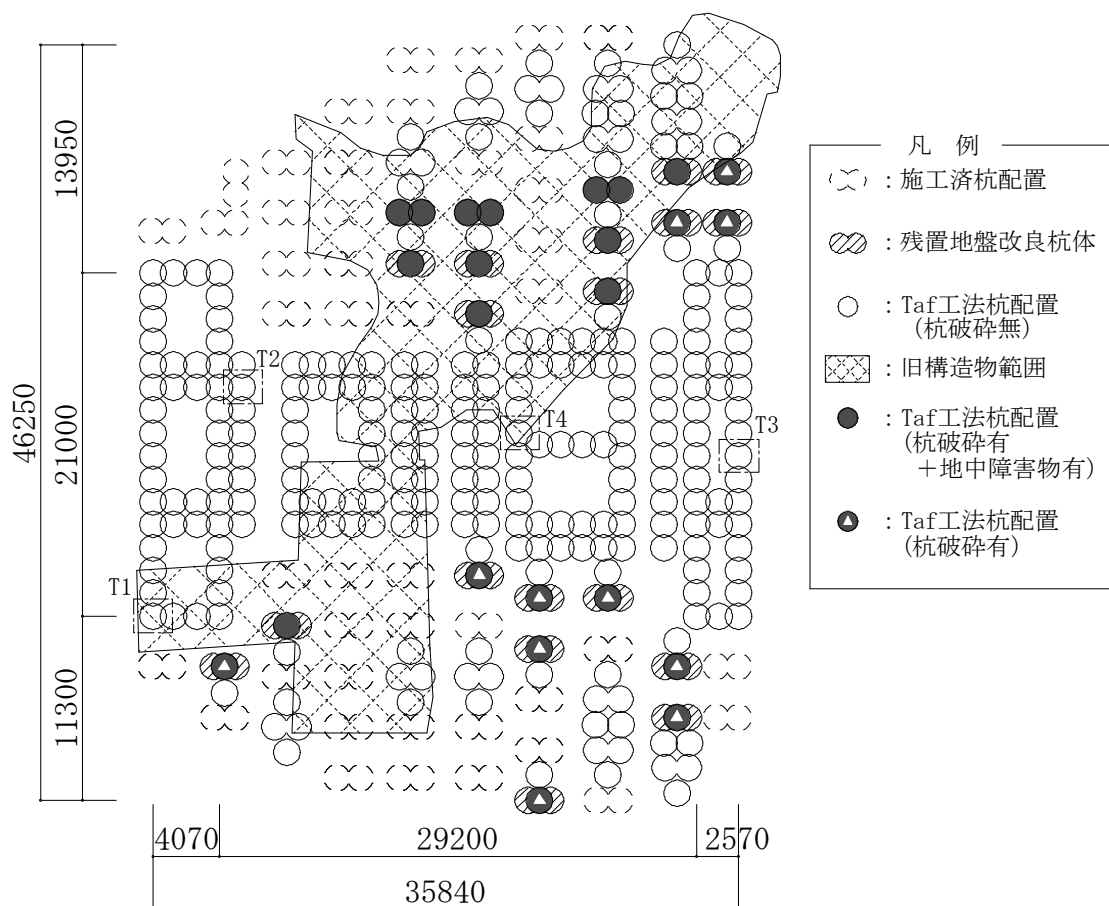


図-3 残置地盤改良体杭位置と地中障害物範囲，および Taf 改良杭配置図



写真-2 残置改良体の破砕状況

表-3 残置地盤改良体の強度分布推移

	上層部 quf(kN/m ²)	下層部(上) quf(kN/m ²)	下層部(下) quf(kN/m ²)
Z1	3,336	1,545	2,104
Z2	3,823	1,108	2,224
Z3	3,155	1,548	2,893
層平均	3,448	1,400	2,407
全平均	2,418		

表-4 Taf 施工後現場改良強度(材齢 28 日)

	上層部 quf(kN/m ²)	下層部(上) quf(kN/m ²)	下層部(下) quf(kN/m ²)
T1	3,283	1,957	1,116
T2	3,382	2,058	1,788
T3	1,660	1,268	1,302
T4	2,010	1,673	1,000
層平均	2,584	1,739	1,302
全平均	1,875		

し、混合攪拌を行わなければならず施工の円滑さが懸念された。

しかしながら、写真-2 より攪拌翼周辺には直径およそ 30cm 大の破砕片が散在し、滞ることなく残置地盤改良杭体を粉砕している状況が見て取れる。

通常の地盤環境に比べ、厳しい条件が二重三重に取り巻く中での改良体造成となったが、Taf 工法は補助工法を援用することなく、当初の計画配

置通りに改良体の造成を実現させた。Taf 工法による施工の妥当性を検証するため、No.T1～T4 改良体から採取深さを 3 層の各深さ域から得た材齢 28 日供試体の現場改良強度を取りまとめた結果が表-4 である。

Taf 施工後の現場改良強度は、採取深さに依存する傾向が認められるが、平均現場改良強度 $quf =$

1,000～3,382kN/m²であり、設計基準強度 $q_{uck}=800\text{kN/m}^2$ を十分満足する結果となった。

改良対象地盤は高止まった地盤改良杭体（改良径 $\phi 1.6\text{m}$ 、長さ $L=4\text{m}$ 、平均強度 $q_{uf}=2,420\text{ kN/m}^2$ ）が残置し、コア長 200mm の玉石が混在する粘土層と $N>20$ の締まった砂層から成る存在する厳しい地盤環境下にあった。しかしながら、Taf 工法は輻湊する改良困難条件を克服し、補助工法を用いることなく当初の計画改良仕様通りに改良体の造成に成功し、同工法の高機能性を十分実証することができた。

4. 低変位施工に向けた技術改良

4.1 低変位施工に向けた技術改良

最近の都市部における再開発工事等では、地盤改良工事が既存の施設・構造物に近接して行われる機会が増大している。地盤改良に伴って発生する周辺地盤の変位は、施工原理から必然の現象であるが、これを抑止する確実な技術が強く求められている。

地盤改良が周辺地盤を変位させる主な要因として、i) 攪拌翼回転装置の挿入、ii) 固化材の圧入等が指摘されている。これらは削孔内に体積変化を強制し、結果として攪拌翼回転部の圧力を高

める。これと地盤の応力異方性が関連して水平変位が発生すると考えられる。したがって、貫入した攪拌翼回転部の圧力状態を把握し、その圧力を適切に調整する機構を備えることで水平変位を抑制することの可能性が示唆される。



写真-3 スパイラルロッド(PIs 工法)による試験施工全景

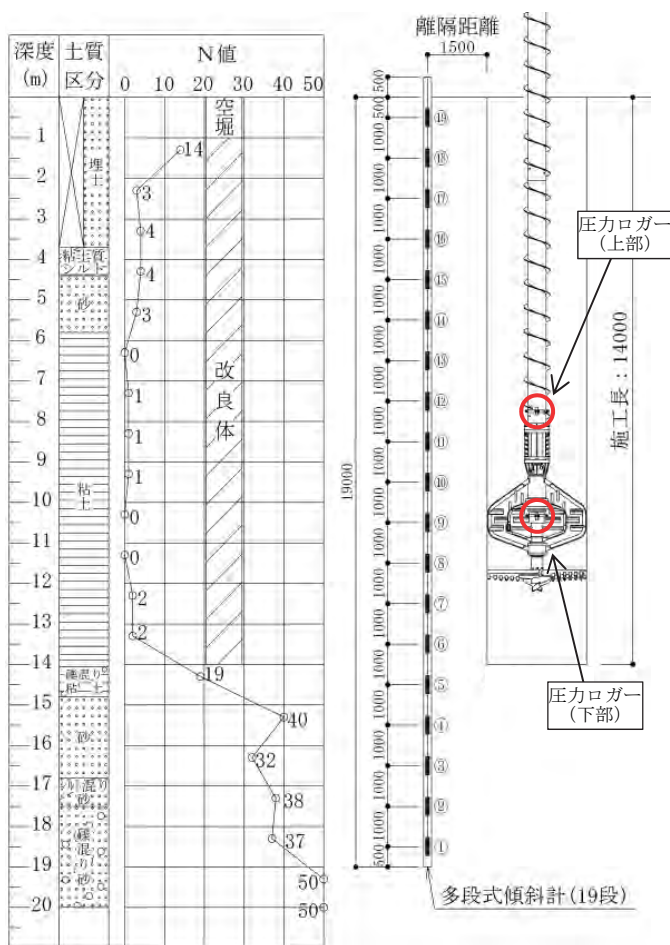
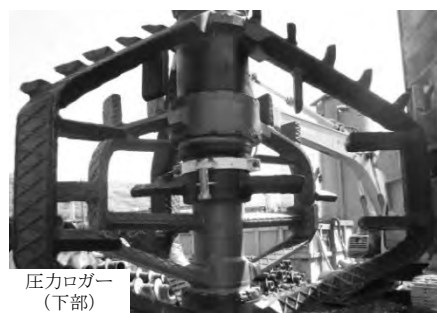


図-4 土質柱状図，改良深度ならびに多段式傾斜計配置図



圧力ロガー(上部)



圧力ロガー(下部)

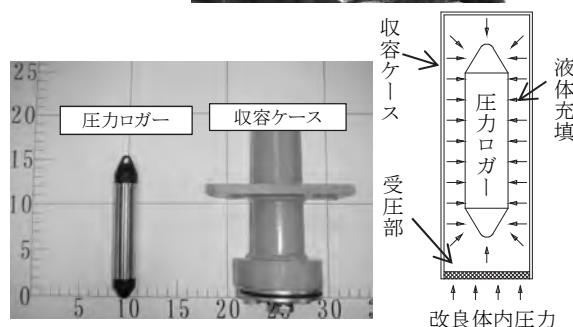


写真-4 圧力ロガーと設置状況

そこで本検討では、エポコラム攪拌翼回転部の圧力を独自のデータロガー付圧力センサー（以下、圧力ロガーと呼称する）で、2箇所計測することを試みた。同時に、周辺地盤の変位を抑止する方法として攪拌回転軸に取付けたスパイラルフィン（以下、スパイラルロッドと呼称する）で排土を促し、極力封入圧力を適正に保つことで低変位を実現することを目指した。

写真-3 は、スパイラルロッドを装着した Pls 工法の施工機全景である。

4.2 地盤条件

図-4 は、試験施工場所の深さ方向に分布する土質と N 値の関係を表す土質柱状図である。また、同図には後述する改良体造成時の地盤変位を測定する多段式傾斜計の配置図が併記されている。地盤は、表層に $3 < N < 4$ のガラを含む埋土層が存在し、その下部は $N \approx 4$ 、層厚 1m 未満の粘土質シルトである。これに $N \approx 3$ 、層厚 1m の砂層、さらに層厚約 8m、 $0 < N < 2$ の粘土層が堆積している。試験施工はこの粘土層底部と改良体下端が一致する範囲を対象に、改良体施工に伴う地盤変位の挙動を調査した。

表-5 改良仕様

試験 No	H-1	S-1
ロッド	標準	スパイラル
改良径	$\phi 2.5\text{m}$	
施工長	14.0m(空堀長 1.0m, 改良長 13.0m)	
添加量(W/C)	$200\text{kg/m}^3(80\%)$	

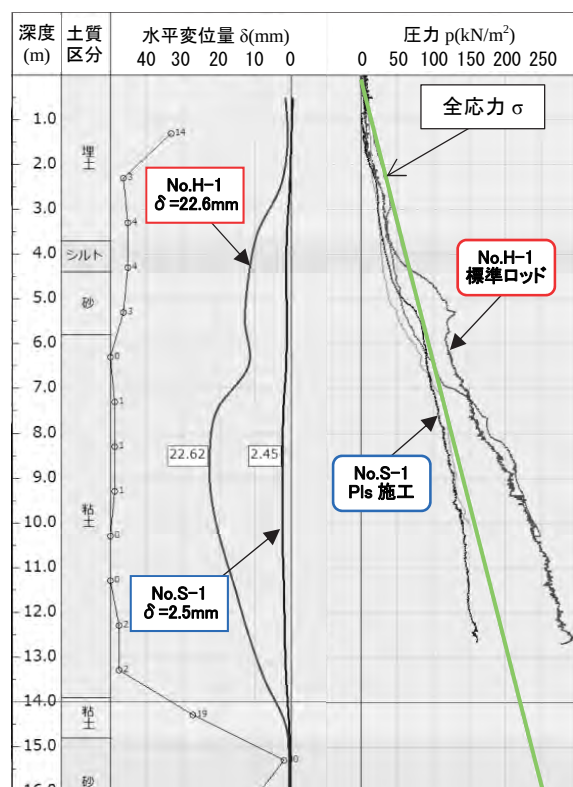


図-5 地中内応力分布と地盤変位量

4.3 施工試験仕様

造成する改良体は改良径 $\phi 2.5\text{m}$ で、施工長は表層から層厚 8m の粘土層下端に達する $L=14\text{m}$ である。固化材添加量は $aw=200\text{kg/m}^3$ ($W/C=80\%$) で、吐出量は攪拌翼先端ならびに翼中より、 $q=2220/\text{min}$ を各孔から吐出した。吐出方法は貫入時吐出とした。このような施工方法を共通として、一つは標準ロッド、他には新たに開発したスパイラルロッドを用いてそれぞれ改良体造成し、周辺地盤に与える変位を比較した。施工試験仕様を表-5に取りまとめて示す。

4.4 攪拌混合時の地中内圧力ならびに周辺地盤の変位測定方法

改良体の造成に伴う地盤変位は、攪拌混合装置の挿入ならびに固化材スラリー吐出時の圧力によって発生すると考えられる。このため、写真-4に示すように攪拌翼内と攪拌翼上部のシャフトの2箇所に圧力ロガーを取付けた。これによりエポコラム攪拌翼の挿入から攪拌・混合に至る地盤内の圧力変化を連続的に捉えられる。なお、圧力ロガーは液体が充填された収納ケースに納められ、受圧部を介して固化材と地盤土が混合した泥土の圧力が伝えられる。写真-4に圧力検出システムの構造を、ならびにこれを攪拌翼中、攪拌翼上部に取り付けた状況の全体図を図-4に示す。

一方、周辺地盤には、図-4のように外翼から離隔距離 1.5m ($x/L=0.11$) の位置に、深度 1m ごとに地盤の傾斜を測定する多段式傾斜計 ($\phi 30\text{mm} \times h450\text{mm}$, 19 段) を設置し、測定結果を積分して攪拌混合時の経時的な水平変位量を算出した。

4.5 攪拌混合時の圧力変化と周辺地盤変位の測定結果

図-5は標準ロッドおよびスパイラルロッドの先端に同じ攪拌翼を取り付けて、改良体造成開始から攪拌翼先端部着底までの間で攪拌混合部に生じた圧力 p と周辺地盤の水平変位 δ の深さ z に対する変化を示している。なお、地盤深度 z ~攪拌混合圧力 p の関係を表すグラフ中に全応力 σ が併記されている。これは地表面を基準にして、固化材スラリー混合土の単位体積重量 γ と深度 z の積を深さに対して描いたもので、地盤内圧力の目安としている。

標準ロッドの場合のエポコラム施工では、固化材スラリーの吐出に伴い徐々に地中内応力が増加し、深度 GL-5.0m 付近通過後から全応力を超過する。深度 GL-9.0m 付近からは圧力上昇はなくなる。

それ以深の圧力は低下せず、全応力 $\sigma=190\text{kPa}$ のおよそ 1.5 倍の $\sigma=280\text{kPa}$ で着底した。

また水平変位量 δ は、固化材スラリーの吐出とともに圧力状態 ($p > \sigma$) に応じて次第に増大する傾向を示し、着底時に地盤深度約 $L=8.5\text{m}$ で最大水

表-6 標準施工とPls施工による造成結果比較

	標準ロッド	スパイラルロッド
最大水平変位(mm)	22.62	2.45
全応力との圧力差(kPa)	+85	-25
固化材総注入量(m ³)	15.19	15.58
排土量(m ³)	6.61	12.51
排土率(%)	44	80

水平変位量 $\delta_{\max}=22.6\text{mm}$ が観測された。

一方、スパイラルロッドを装備した Pls 工法の場合では、固化材スラリーの吐出開始から攪拌翼先端部着底に至る間の圧力 p は、全応力 σ の大きさにほぼ一致し ($p \approx \sigma$)、標準ロッドのように $p > \sigma$ のような過大な圧力の発生は認められなかった。

その結果、水平変位量は小さく $\delta=2.5\text{mm}$ の値に止まった。これは標準ロッドの場合のおよそ 1/10 の値である。表-6 に標準ロッドおよび Pls 工法のスパイラルロッドを用いて $\phi 2.5\text{m} \times \text{L}14\text{m}$ の改良体造成した比較データを取りまとめて示す。

同表から、2 方法の施工方法では、改良体造成に使用した固化材注入量はほとんど同量である。しかしながら、地中より排出された 1 本施工当たりの排土量は標準ロッドで $v=6.61\text{m}^3$ 、スパイラルロッドではその約 2 倍量の $v=12.51\text{m}^3$ となった。この点にこそ、スパイラルロッドを装備した Pls 工法の狙いがある。すなわち、周辺地盤に生じる変位の抑制には、排土を促すことが極めて効果的であることが首肯される。なお、Pls 施工時に排出される排出土の性状は、固化材を含み自硬性があるため固結化する。

4.6 Pls 工法による低変位施工の実績

今回の試験工事よりスパイラルロッドが排土を効率高く促進させ、これを装備した Pls 工法が高い低変位性能を有することが確認された。そこで Pls 工法の低変位性を既存の工事実績より検証することを試みた。図-6 は、Pls 施工の 6 ケース、ならびに標準ロッドによる 4 ケースの計 10 ケースについて発生した水平変位量を現場にて測定した結果である。なお、図中の縦軸に水平変位、横軸は改良域からの離隔距離 x を改良体長さ L で規準化した x/L として、両者の変位量の挙動を比較した。

改良域に近いすなわち、 $x/L=0.1$ のように小さな範囲では標準ロッドによる水平変位量は $\delta=70\text{mm}$ を超えるが、Pls 施工では高々 $\delta=10\text{mm}$ 以下の 1/7 以下に止まり、周辺への影響を効果的に軽減している。また、 $x/L > 0.5$ 範囲になれば両者はほぼ同程度の変位量に収束している。

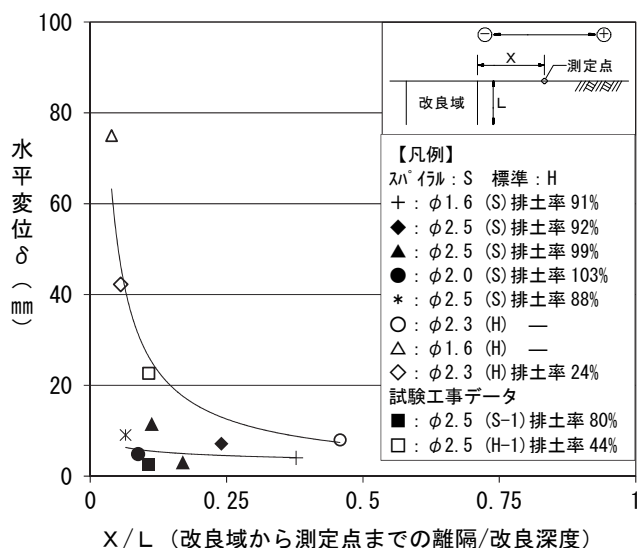


図-6 Pls 工法と標準ロッド施工による x/L 比と水平変位量

5. まとめ

エポコラム工法を基礎技術として、地盤改良を阻害する要因を克服する事例ならびに地盤変位抑止技術の適用性について紹介した。その結果、

(1) Taf 工法は 3 つの改良阻害要因（地中障害物、中間層、残置改良体）が複合する地盤を、補助工法を使用することなく、同一工程で仕様に合致した改良体を造成することに成功した。

(2) Pls 工法では施工機の回転軸に装備したスパイラルフィンが地盤土の引上げを促し、攪拌混合部の圧力を抑え、周辺地盤の変位を最小限に抑止することを確認できた。当技術は、大口径化施工の低変位化を確実にする工法の一つと位置付けられ、都市部の再開発事業に大きく寄与することが考えられる。

すなわち、エポコラム工法がラインアップする技術は様々な施工環境における地盤工学上の諸課題に適用され、多大な成果をもたらしている。今後も先進的な技術開発に果敢に挑戦し、地盤改良技術の向上と適用性の拡大に務める所存である。

参考文献

- (一財)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—Loto工法、Taf工法、Pls工法—」, pp.7~14, 2017
- 松岡大介・西尾経・竹田敏彦・市川公彦・高倉功樹・齋藤邦夫：最新の地盤改良技術と施工事例，第15回土質基礎に関する「我が社の誇れる技術」技術報告会，北海道土木技術会，pp.32~39, 2017.2