

# 残置された高強度 PHC 杭破碎工と地盤改良工との同時施工 複合相対攪拌工法・エポコラム-Loto 工法

鈴木 孝一・齋藤 邦夫・原 満生・高倉 功樹

複合相対攪拌工法は、籠状の高剛性攪拌翼を高トルクの下で相対反転させ、改良障害物を含む不均質地盤内に $\phi 2.50\text{ m}$ の改良体を造成する。そこで本工法をPHC杭が残置された地盤の改良に適用し、杭の破碎工と地盤改良工の同時施工能力について精査した。掘り出した改良体の観察より、PHC杭は10～50 mmに破碎されて改良体全体に様に分散することが認められた。採取したコアの一軸圧縮強さは、いずれも設計基準値を満足し、変動係数も従来工法における値と比べ、同等もしくはそれ以下となることを確認した。以上の結果より、本工法による同時施工は、実用上十分な施工性能と改良体品質を有することが実証された。

キーワード：地盤改良，深層混合処理工法，複合相対攪拌工法，大口径，工期短縮，コスト縮減，PHC杭，同時施工

## 1. はじめに

今日、地盤改良を含むすべての施工技術が直面する課題は、設計で仕様された性能を確保しつつ、いかに i) 工期短縮と ii) コスト縮減を実現するかの二点に集約される。その結果、地盤改良工では改良体の大径化に関する技術が注目を集め、技術開発が展開された。しかしながら、工程そのものの単純化を図って工期・コストを合理化する方法も考えられる。

地盤改良に寄せられるもう一つの期待として、社会インフラの再整備や施設の再開発に伴い、杭が残置されたような特殊地盤に対しても適用可能な技術の実用化が強く要望されている。

複合相対攪拌工法は、籠状の外翼と中翼および水平状の芯翼の3種類の攪拌翼から構成され、これらを相対反転させて対象土に固化材を強制的に練込む機構を備えた深層混合処理工法の一つである。様々な技術改良の結果、現在、改良径 $\phi 2.50\text{ m}$ の大径化が実現されている。本工法は高剛性の特殊籠状翼と高トルク攪拌機構の採用により、コンクリートガラや転石等が混在する地盤に対しても適用され、多くの実績を有している。

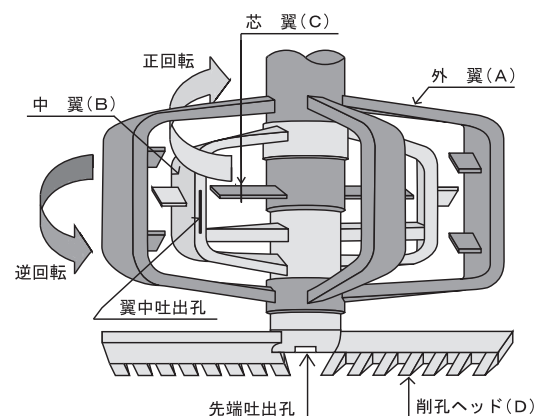
また、建築物の建替え工事では、前述したように地盤内に残置された基礎杭の取り扱いが大きな課題となる。すなわち、新設される建築物の性能に応じて基礎形式が選定されるのが普通であり、従来工法では地盤

内に残置された杭を先ず排除し、その後、仕様に合致した基礎を設ける手順を踏む。しかしながら、「残置杭の処理工」と「基礎の新設工」の二つの工程が同時に実施できれば工期、工費の面で大きなメリットになる。

そこで本文では、設計基準強度 $80\text{ N/mm}^2$ 以上の高強度PHC杭が残置された地盤を対象に、複合相対攪拌工法を適用して既存PHC杭の破碎と攪拌混合処理を同時に行った地盤改良の施工性、改良体のコア性状および強度特性について精査した結果を報告する。

## 2. 複合相対攪拌工法の概要と特徴

複合相対攪拌工法の攪拌翼構造と回転方向を図一1



図一1 複合相対攪拌翼の模擬図

に示す。同図より、攪拌翼は台形状の外翼 (A)、中翼 (B) がそれぞれ 3 枚、約 30° 傾きを持たせた芯翼 (C) 2 枚および軸端に改良径を規定する爪付の削孔ヘッドから構成されている。

まず、削孔ヘッドが回転し、爪で地盤を掘削し同時に粗大異物を砕いたりしながら、籠状の攪拌翼内に送り込む。送り込まれた地盤土、破碎物に削孔ヘッドならびに中翼の吐出孔の 2ヶ所から固化材が供給され、3種の攪拌翼が相反して回転することによって強制的な練り込み作用が発揮されるため、一様性の高い柱状改良体が地盤内に形成される。また、3種の攪拌翼が相反して回転動作するため、付随する効果として「共回り」、「つれ回り」現象を抑制することも機能上の特徴である。

さらに当工法が採用している回転駆動装置では回転数を抑制し、最大トルクは 355 kN・m (回転数 4.8 rpm) としている。この値を類似の他工法の掘削トルク値 132 kN・m (回転数 13 rpm) と比較すると約 3 倍もの出力になる。このトルク性能と回転軸に装着した攪拌翼の剛性の高さが、これまでにない削孔能力を発揮させ、 $N$  値 = 40 ~ 50 の砂礫層や中間層あるいは玉石混じり層の削孔・攪拌を可能にしている<sup>1)</sup>。

### 3. 既設杭が残置された地盤における改良攪拌施工

対象工事は、旧建築物を解体後、同場所に新たな複合商業施設を設ける計画である。フーチング基礎下の地盤を複合相対攪拌工法により地盤改良し、改良柱体を造成することとなった。すなわち、同工法により杭破碎を行うと同時に所定強度を有し、かつ改良径  $\phi$  1.80 m、改良長  $L = 12.9 \sim 15.5$  m の改良柱体を地盤内に造成することが計画された。

#### (1) 地盤概要

施工地盤の土質柱状図を図-2 (a) に示す。土質は、地表面より GL-1.3 m までコンクリートガラ主体の埋土、その下層に軟弱な砂、シルト層の互層がおよそ 7 m 堆積している。GL-8.5 m から下には、 $5 \leq N$  値 < 20 の礫混じり砂層が続く。その直下に層厚 1.1 m のシルト層が挟在し、GL-13.4 m 以深から  $N$  値 > 20 ~ 40 の礫混じり砂層に連なる。また、当地盤内には、旧建築物を支えていた  $\phi$  450 mm の PHC 杭、 $\phi$  300 mm の PHC 杭と RC 杭がおよそ 13 m の深さに亘って残置されている。

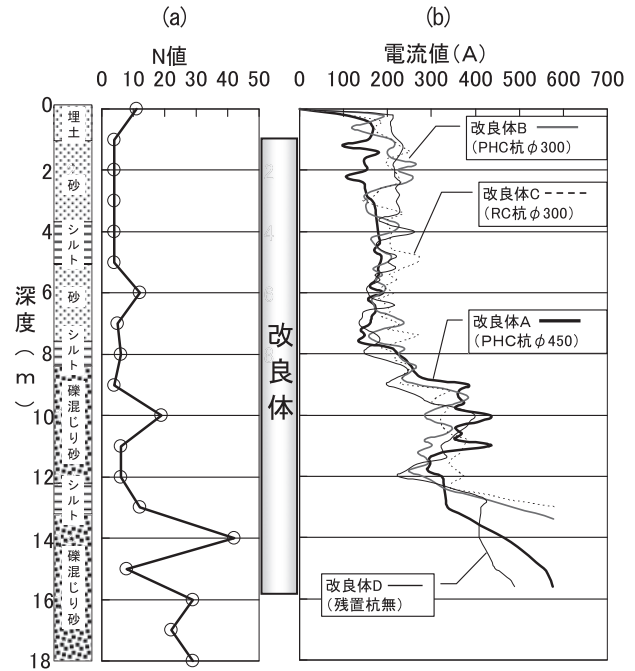


図-2 土質柱状図と駆動モータの電流値比較

#### (2) 除去工を併用する従来の施工法

地盤改良工にとって障害と認められる残置された PHC 杭等が存在する場合、一般的には図-3 に示す手順にしたがって工事が進められる。すなわち、杭の位置を確認し、頭出しを行ってオールケーシング工法で杭を取り除き、深層混合処理機によって固化材を吐出させながら地盤を攪拌・混合して所定の改良体を造成する。通常的地盤改良施工に比べて、残置杭を除去する前処理工程の時間と経費が必須となる。さらに杭配置が不明の場合は、杭の配置確認も必要になり、前述した前処理工程を考慮すると大幅に工期、工費が増大する。

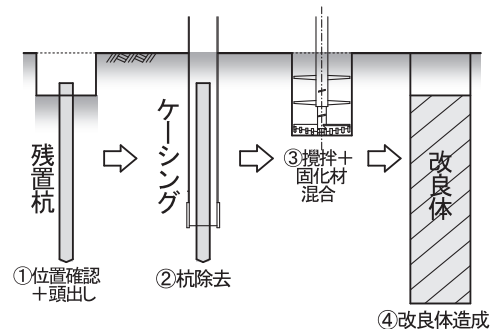


図-3 従来工法の施工手順

このような場合、1) 改めて杭を除去するか、2) 設計条件を満たす範囲で改良体位置の変更あるいは、3) 改良体を増打ちによって対処しなければならず、大幅な施工工程の変更が発生する。

### (3) 複合相対攪拌工法による施工法

複合相対攪拌工法は、高剛性の籠状攪拌翼と高出力トルク回転機構の組み合わせにより、図-4に示すように一工程で杭を破碎しながら、地盤土と固化材を攪拌混合して、改良体を造成することが可能である。

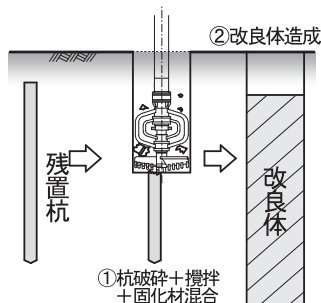


図-4 エボコラム-Loto工法の施工手順

本研究では、杭の破砕片を巻き込んだ改良体の品質と施工性能の調査および評価検証を行った。

改良位置と残置杭との位置を表-1に示す。3種の残置杭について同時施工時の攪拌性能および改良品質について比較調査した。これに残置杭が存在しない場合を加え、計4通りとした。それぞれにA～Dの記号を付して区分する。Aは残置されたφ450mmのPHC杭が改良域内の外縁に位置する場合である。B、Cはφ300mmのPC杭、RC杭の場合で、Aに比べ杭が改良体中心より位置している。

表-1 地盤改良施工仕様と残置杭位置

番号	A	B	C	D
形状				
改良径(m)	φ1.80	φ1.80	φ1.80	φ1.80
既設杭(mm)	PHC杭; φ450	PHC杭; φ300	RC杭; φ300	なし
施工長(m)	15.50	13.02	12.90	15.50
空堀長(m)	1.45	1.45	1.45	1.45
改良長(m)	14.05	11.57	11.45	14.05

写真-1は、頭出しを行った残置杭と改良体の施工予定個所との相対的な位置関係を示したもので、記号Aで示す場合に相当する。すなわち、杭径φ450mm、肉厚t=80mmの残置PHC杭が改良予定円の右内側に位置している。また、同写真には、杭頭部よりらせん筋のPC鋼線が複数認められる。

#### (a) 複合相対攪拌工法適用時の掘削貫入抵抗

掘削貫入時に攪拌翼が受ける抵抗の大きさは、地盤の種類・強度、残置杭の種類、改良体との相対位置等に関係する。また、掘削貫入抵抗は、攪拌軸を回転駆

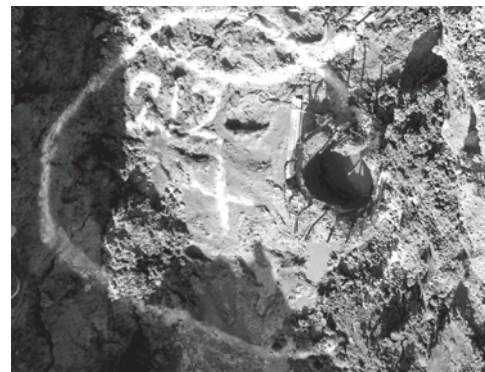


写真-1 残置杭・改良体確認(改良体A)

動させるモータの電流負荷に直接連動している。そこで表-1で区分したA～Dの4ケースについて、掘削貫入に伴う駆動モータの電流値の変化を測定し、比較することを試みた。図-2(b)がその結果である。

同図より、地盤上部GL-3.0m付近までの埋土部分の電流値は、4者のデータに比較的大きな変動が認められる。これは不均質なコンクリートガラが主体の埋土であるため、この影響が反映したものと考えられる。埋土に続くGL-3.0～-8.0mは、 $3 < N < 6$ の軟弱な砂層、シルト層であり、4ケースとも200A程度の電流値になっている。礫混じり砂層となるGL-9.0m以深から電流値は漸次300Aまで増大し、改良体の造成深度であるGL-15m近傍ではおよそ500Aとなった。

#### (b) 施工性能について

電流値の地盤深度に対する応答を見る限り、残置杭の種類、改良体との相対位置によって極端に大きな違いは認められない。装備した駆動モータが十分なトルクを有していることがその理由と考えられる。

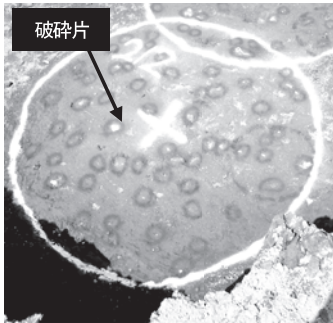
本工法は、改良範囲内に1本程の残置杭があっても、杭種に依らず施工性能に影響しないことが判明した。

## 4. 改良体の品質評価

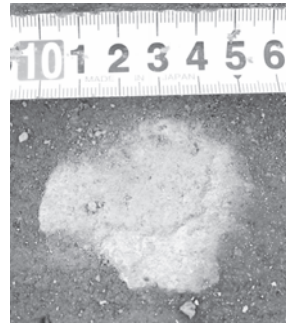
### (1) 杭破砕片の分布

複合相対攪拌工法によって造成したφ1.80mの改良体天端部の出来形を確認したのが写真-2である。図中の白線が示しているのが改良体断面であり、計測結果より所定改良径φ1.80mが確認できる。改良断面内に一様に小塊が散在しており、これが杭の破砕によって生じた小片で、大略10～50mmの大きさであった。破砕片の一つを拡大したのが写真-3である。形状は不定で目視により長径を代表値としたとき、およそ50mm程度と判断される。

一方、写真-4は、改良長14.7mの改良体に対し、



写真一2 出来形状況 (改良体 A)

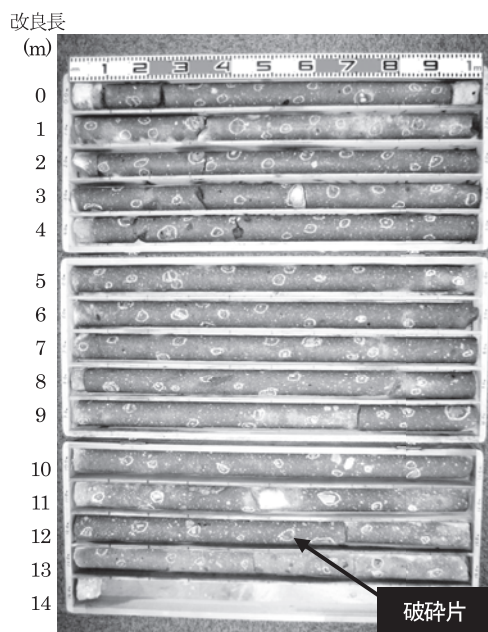


写真一3 残置杭破砕片

直径φ86 mm のオールコアボーリングによって採取したコアの状況である。コアの全長に亘って残置杭の破砕片が大きな偏りなく、均一に混入しているのが認められる。また、図一5は、写真一4に対比させて作成したコアの詳細なスケッチである。図中、黒く塗りつぶした個所が杭破砕片、斜線部分が混入礫である。コアはいずれも破砕片混入による欠損部は殆どなく良好で、コア採取率は97～100%にあり、平均採取率は99.4%であった。

試みに採取したコア1 mの投影面積に占める杭破砕片の面積を精密計測し、破砕片混入率(=破砕片合計面積/コア採取投影面積×100)を算出した。その結果、混入率は0.9～3.7%であり、平均値は1.7%となった。改良体(φ1.80 m)に対する残置杭(φ450 mm, t=80 mm)の体積比率は3.9%で、これを投影面積比率に換算すると1.73%であり、コアの破砕片混入率の平均値と良く対応する。

採取コアの写真とスケッチならびに算出した破砕片



写真一4 全長コア状況

混入率より、攪拌翼によって破砕された杭片は、原地盤土に固化材と共に練り込まれ、改良体全体に適当に分散、混合されていると判断できる。

(2) 改良体の強度特性

写真一5は、改良区分Aによって造成した改良体から採取し、成形した一軸圧縮試験用供試体の例である。供試体内に様々な杭破砕片が取り込まれているのが判る。



写真一5 コア供試体状況

また、造成した2本の改良体の上層(GL0.0～-5.0 m)、中層(GL-5.0～-9.0 m) および下層(GL-9.0～-14.0 m) から採取した3供試体に対して実施した一軸圧縮強さ結果を表一2に取りまとめた。杭粉砕片を含む改良土の一軸圧縮強さは、 $qu \approx 8,000 \text{ kN/m}^2$ であり、また変動係数  $V_c = 18.5\%$ と小さい。

改良長 (m)	土質区分	コアの状況 (スケッチ)					掘進長 (m)	採取長 (m)	採取率 (%)	破砕片面積 (cm <sup>2</sup> )	合計面積 (cm <sup>2</sup> )	コア投影面積 (cm <sup>2</sup> )	破砕片率 (%)
		0	20	40	60	80							
0		[Sketch]					1.00	0.99	99	7.7	643.5	643.5	1.2
1		[Sketch]					1.00	0.98	98	13.2	637.0	637.0	2.1
2		[Sketch]					1.00	1.00	100	11.0	650.0	650.0	1.7
3	砂質土	[Sketch]					1.00	1.00	100	23.9	650.0	650.0	3.7
4		[Sketch]					1.00	1.00	100	10.9	650.0	650.0	1.7
5		[Sketch]					1.00	1.00	100	9.5	650.0	650.0	1.5
6		[Sketch]					1.00	0.97	97	13.2	630.5	630.5	2.1
7	砂質土	[Sketch]					1.00	1.00	100	12.8	650.0	650.0	2.0
8		[Sketch]					1.00	0.99	99	9.0	643.5	643.5	1.4
9		[Sketch]					1.00	1.00	100	18.0	650.0	650.0	2.8
10		[Sketch]					1.00	1.00	100	7.2	650.0	650.0	1.1
11	砂質土	[Sketch]					1.00	0.99	99	14.2	643.5	643.5	2.2
12	砂質土	[Sketch]					1.00	1.00	100	8.9	650.0	650.0	1.4
13	砂質土	[Sketch]					1.00	0.99	99	5.5	643.5	643.5	0.9
14	砂質土	[Sketch]					0.05	0.05	100	0.0	32.5	32.5	0.0
								平均	99.4		平均	1.7	

図一5 全長コアスケッチおよび杭破砕片混入率

表一2 改良体 A の一軸圧縮強さ結果

試験深度	qu (kN/m <sup>2</sup> )	試験深度	qu (kN/m <sup>2</sup> )
上層 ①-1 GL-0.0m ~GL-2.5m	6,652 9,395 6,858	上層 ①-2 GL-2.5m~ GL-5.0m	6,221 6,344 6,837
中層 ②-1 GL-5.0m~ GL-7.0m	6,591 7,003 7,352	中層 ②-2 GL-7.0m~ GL-9.0m	7,676 7,391 7,307
下層 ③-1 GL-9.0m~ GL-11.5m	9,825 9,359 9,606	下層 ③-2 GL-11.5m~ GL-14.0m	11,422 8,965 9,518
平均	8,071	平均	7,965
全平均値	8,018 kN/m <sup>2</sup>		
標準偏差	1,479 kN/m <sup>2</sup>		
変動係数	18.5%		

### 5. 複合相対攪拌に伴う杭中の PC 鋼線・らせん筋の挙動

前述したように複合相対攪拌工法によって PHC 杭が残置された地盤に造成した改良体は、変動係数に基づく限り品質的に十分なものと判断できる。しかしながら、残置された PHC 杭は高強度コンクリート、PC 鋼線ならびにらせん筋線によって構成されており、その破碎に伴う鋼線の挙動が注目される場所である。

著者らは、すでに複合相対攪拌工法による杭体の破碎メカニズムについて指摘しており、詳しくは既往の文献を参照されたい<sup>2)~6)</sup>。

ここでは、改良体造成後に捉えた杭体中の PC 鋼線の状況から、混合攪拌中の PC 鋼線の挙動について推察した結果を以下に述べる。

写真一6は、改良体を造成して引き上げた直後の攪拌翼である。外翼 (A) 下端部分と削孔ヘッド (D) に相当量の PC 鋼線が巻き付いて回収された。しかし、PC 鋼線は本来の長さよりかなり短く、途中多くの箇所で破断しているのが確認できる。PC 鋼線に付着している泥土を水で洗い流した後の状況が写真一7である。φ9mm の鋼線とらせん筋が絡み合い毛玉状に



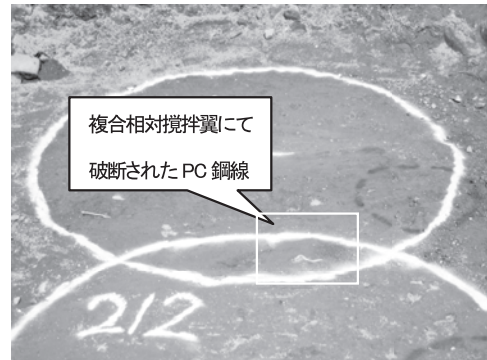
写真一6 複合相対攪拌翼によって破断した PC 鋼線



写真一7 水洗浄後の攪拌翼に巻き付き破断した PC 鋼線

なっているのが認められる。

一方、写真一8は複合相対攪拌工法でφ1.80mの改良体をラップ施工したときの出来形断面であるが、ラップ施工部の□印の部分にφ9mmのPC鋼線の破断片が認められた。



写真一8 改良体ラップ部の改良体断面

ラップ部の PC 鋼線の破断片を拡大したものが、写真一9である。同写真より、本来真直ぐである筈の PC 鋼線は、その状態よりねじりや曲げを受けて切断されていることが判る。さらに左端断面の状況から、PC 鋼線は最終的に引っ張りによって破断したことが考えられる。



写真一9 混合攪拌にて破断された PC 鋼線の小片

すなわち、PC 鋼線は、相対回転する外翼 (A) と中翼 (B) によってせん断、引っ張り荷重を複雑に受

けることが推察される。

写真—6, 7に示されるPC鋼線は、PHC杭中の大部分であると思われる。しかしながら、小片に切断され、改良体内あるいは周辺に取り残されているものも少なからずあると考えられる。

PC鋼線の巻付き、引き揚げられた状況と似た点は、残置されたプラスチックボードドレーン材施工地盤での改良事例でも確認<sup>7)</sup>され、一方向回転方式の従来攪拌工法に比べ、巻付きが短尺となり、除去作業も比較的容易であるばかりでなく、巻付きによるスラリー吐出孔の閉塞懸念がないことも優れた点と考える。

## 6. まとめ

本文では、低速回転・高トルク型の本複合相対攪拌工法を用いて、3種類の異なる残置杭が地中障害として残置する地盤を対象に残置杭破碎と地盤改良の同時施工を行い、その施工性と改良品質について精査した。その結果は、以下のとおりである。

- ①本工法の施工においてPHC杭(φ450mm)が残置されている場合でも、事前にこれを除去することなく、目的とする改良施工を達成することができた。
- ②残置杭(PHC杭φ450mm)の破碎抵抗は、通常施工の施工と同程度であり、他の種類の残置杭(PHC杭φ300mm, RC杭φ300mm)の破碎抵抗と比較しても抵抗に特段の差異がない。
- ③杭破砕片は、平面方向および垂直方向ともに改良体の内部に均一に分散していた。
- ④杭体破碎同時施工の条件下であっても、改良体の一軸圧縮強さの変動係数は25%以下と安定し、通常施工における改良コアとほぼ同等であった。
- ⑤残置されたPHC杭から相当量のPC鋼線が回収された。その一部は破断されて小片化し、改良体に含まれているのが認められた。

JCMA

### 《参考文献》

- 1) (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；大口径φ2,500地盤改良工法)」2006.3
- 2) 齋藤邦夫, 鈴木孝一, 原満生, 高倉功樹：低速回転・高トルク型複合相対攪拌翼による深層混合処理工法の施工性能について, 平成20年度建設施工と建設機械シンポジウム論文集, pp.147～150, 2008.10
- 3) 鈴木孝一, 立石光一, 原満生, 高倉功樹：エポコラム-Loto工法(大口径深層混合処理工法)の概要と適用事例, 第7回土質基礎に関する「新工法・新技術」技術報告会, 北海道土木技術会, pp.1～8, 2009.1
- 4) 齋藤邦夫, 鈴木孝一, 西尾経, 原満生, 高倉功樹：残置PC杭の混在する地盤におけるエポコラム-Loto工法(大口径深層混合処理工法)の適用事例, 基礎工, Vol.37, No.5, pp.51～53, 2009.5
- 5) 齋藤邦夫, 鈴木孝一, 田中信哉, 原満生, 高倉功樹：エポコラム-Loto工法—残置PC杭破砕工と地盤改良工の同時施工, 建設機械, 536, Vol.45, No.10, pp.68～72, 2009.10
- 6) 齋藤邦夫, 鈴木孝一, 原満生, 佐藤篤哉, 高倉功樹, 古澤政夫, 蓮香朋宏：複合相対攪拌翼を用いた深層混合処理工法の改良原理と適用事例, 第8回地盤改良シンポジウム論文集, pp.177～182, 2008.11
- 7) 齋藤邦夫, 鈴木孝一, 高倉功樹：地中障害物混在地盤に対する複合相対攪拌工法の適用事例, 平成22年度建設施工と建設機械シンポジウム論文集, 2010.11, 投稿中

### 【筆者紹介】

鈴木 孝一(すずき こういち)  
小野田ケミコ(株)  
取締役 専務執行役員  
技術士(総合技術監理部門・建設部門)



齋藤 邦夫(さいとう くにお)  
中央大学 研究開発機構長 理工学研究所長  
理工学部 教授  
工学博士



原 満生(はら みつお)  
エポコラム協会  
会長



高倉 功樹(たかくら こうき)  
エポコラム協会  
技術部

