

FUNC-RES 工法(杭引抜き孔の再生改良工法)の開発

北 島 明 土佐内優介
三 嶋 伸 也 宮 澤 翔

概 要

近年、建物の建替えに伴う新設杭と既存杭の干渉により、既存杭を引き抜き、その撤去孔を埋め戻す工事が増えてきている。このような引き抜き後の撤去孔は流動化処理土やセメントミルクで埋め戻すのが一般的である。しかし既存杭の撤去孔の処理に関して定められた基準がなく、適切な埋戻し処理がなされなかった場合、周辺地盤と比較して極端に軟弱な部分や硬い部分が地中に造成され、新設杭の施工時に孔曲がりによる再施工などトラブルが起りやすい。

筆者らはこうしたトラブルを未然に防ぎ、新設杭の施工をスムーズに実施するため、孔底に堆積した軟弱土(以下、孔底堆積土と称する)に改良体の体積を補う砂(以下、体積調整砂と称する)と固化材スラリーを加えて攪拌混合し、均質な改良体で既存杭の撤去孔を埋め戻す工法(FUNC-RES 工法)を開発した。本稿では FUNC-RES 工法の概要と、新たに開発した攪拌装置による実験工事の結果について報告する。

Development of regeneration method for removed existing pile holes (FUNC-RES method)

Abstract

In recent years, there has been an increase in construction work where removed existing piles need to be backfilled because of the interference between new piles and existing piles due to rebuilding. In such cases, the removal holes are usually backfilled by cement-milk or fluidized soil with cement. However, there is so far no established standard for the treatment of backfilling holes, and if they are not processed properly, there will be some soft or hard areas compared to the surrounding ground. Consequently, problems such as construction delays are likely to occur through building new piles.

In order to prevent such problems, we have developed a new construction method called “FUNC-RES method” by mixing the mud-soil deposited in the hole, sand for volume increase, and cement slurry on site. In this paper, we explain an outline of the FUNC-RES method, the newly developed stirrer, and the results of experimental construction work including full-scale experiments using real piles.

キーワード: 杭撤去孔埋戻し、地盤改良、一軸
圧縮強さ、孔曲がり

§1. はじめに

近年、建物の建替えに伴う新設杭と既存杭の干渉により、既存杭を引抜き、その撤去孔を埋戻す工事が増えてきている。しかし既存杭の撤去孔の処理に関して定められた基準がなく、引抜き後の処理が不十分な場合はその後の新設杭の施工時に孔曲がりによる再施工などトラブルが起りやすい¹⁾。

筆者らはこうしたトラブルを未然に防ぎ、新設杭の施工をスムーズに実施するため、孔底に堆積した軟弱土(以下、孔底堆積土と称する)に改良体の体積を補う砂(以下、体積調整砂と称する)と固化材スラリーを加えて攪拌混合し、均質な改良体で既存杭の撤去孔を埋め戻す工法(FUNC-RES 工法)を開発した^{2),3)}。本稿では FUNC-RES 工法の概要と、新たに開発した攪拌装置による実験工事の結果について報告する。

§2. 撤去孔埋戻し不良による問題点

建物撤去後の地中に存置された既存杭を縁切・引抜き工法で撤去する場合、撤去孔の埋戻しには流動化処理土や固化材スラリーを用いるのが一般的である。しかし図1に示すように、ケーシングによる縁切り過程で泥土化した孔底堆積土は撤去孔下部に堆積し、孔口から供給された流動化処理土とは混合されない。また、トレミー管を用いて底部から流動化処理土や固化材スラリーを打設しても上層・下層が入り替わるだけで孔底堆積土が混合されない点では同様である。

このように2層化した埋戻し材料をエアブローやスパイラルオーガを用いて攪拌を試みた事例があるが、いずれも良好な結果は得られていない⁴⁾。このような撤去孔の孔底堆積土の部分は周辺地盤と比較して強度が低く、固化材スラリーが硬化した部分は高くなる。そのため図2に示すように、新設杭孔を削孔する際にスパイラルオーガ先端が軟弱部方向に引き込まれる現象、あるいは強度が高い部分から逃げてしまい、計画通りに掘削できない現象、いわゆる孔曲がりが生じ易くなる。

孔曲がりが生じるとその都度修正掘削が必要になるため計画通りに工事が進捗せず、他工事の工程にも大きな影響をおよぼす可能性がある。また、たとえ修正掘削により削孔を完了したとしても、計画以上の断面形状になるほか、埋戻し部の強度が不十分な場合、新設杭の掘削時に埋戻し部の孔壁の崩壊の可能性がある。

このような手戻り作業による工期の延長や資源の浪費を避けるために、均質で適度な強度を持つ改良土で既存杭撤去孔を埋め戻すことが重要である。

§3. 新たに開発した攪拌装置

このような背景を踏まえ、筆者らは孔底堆積土と後述する体積調整砂、固化材スラリーを効率的に攪拌混合する装置を新たに製作し、均質な改良体で撤去孔を埋め戻す工法(FUNC-RES 工法)を開発した。

攪拌装置は図3に示すように先端から固化材スラリーを吐出できる攪拌機と既存杭撤去時に使用するケーシングと攪拌機を接続するアダプター部分からなる。アダプターはケーシングの回転力を攪拌翼の中心軸へ伝達する機構と、ケーシング外周に設置された注水管を掘削翼先端へ接続する機構を兼ねている。既存杭を撤去する際に用いられるケーシングは施工会社が独自に製作して使用している場合が多く、その接続部分の形状仕様は統一されていない。また、その径は撤去対象となる杭径によって様々な種類があるが、本攪拌装置は使用するケーシングに合わせてアダプター部分のみを交換することにより容易に攪拌機を接続出来るため、汎用性に優れている。

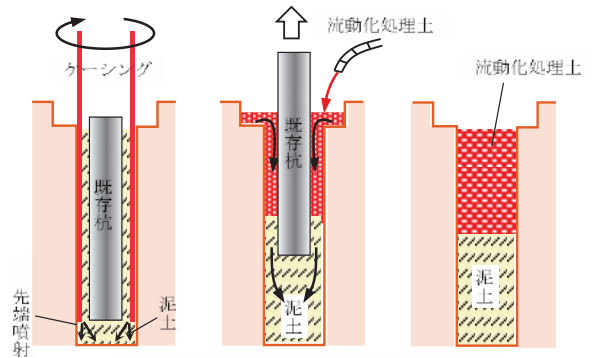


図1 従来の既存杭撤去孔の埋め戻し方法

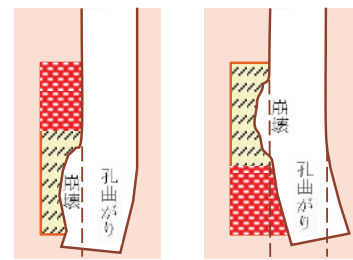


図2 新設杭打設時のトラブル事例

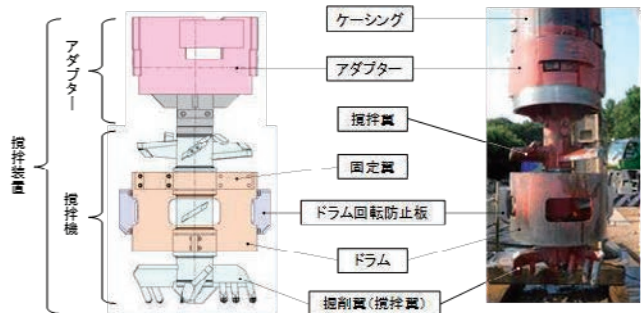


図3 新たに開発した攪拌装置

攪拌機は攪拌翼、固定翼、先端に固化材スラリー吐出口を備えた掘削翼からなり、ケーシングが回転すると攪拌翼と掘削翼は連動して回転する。一方、孔壁に食い込んだドラム回転防止板によりドラム部分と固定翼は回転しない。この構造により、ケーシングを正転あるいは逆転させながら攪拌する際、攪拌機先端部分で固化材スラリーを添加された攪拌対象土はドラム内を通過する時に攪拌翼と固定翼により細断されるため、塊状の粘性土でも効率良く攪拌混合することが可能である。

§4. FUNC-RES工法の概要

4.1 FUNC-RES 工法の施工手順

FUNC-RES 工法の施工手順を図 4 に示す。

- ① 既存杭にケーシングを被せて掘削し縁切りする。
- ② ワイヤーを掛けて既存杭を引抜く。杭長が長く、切断しながら撤去する場合、コンクリート塊などが撤去孔に落下しないよう養生する。
- ③ 撤去孔に体積調整砂を投入する。
- ④ ケーシングの先端を攪拌装置に交換し固化材スラリーを注入しながら複数回反復し攪拌混合する。改良体長が長い場合には複数層に分けて下層部から上層部へ順次攪拌混合する。
- ⑤ 改良体の上端を改良土等で埋戻す。

4.2 体積調整砂の算定

図 5 に既存杭を縁切・引抜き工法で撤去した場合の撤去孔の概念図を示す。既存杭の杭周ソイルを含めた径を D_s 、引抜き時に使用するケーシングの突起部分を含めた外径を D_k 、撤去する既存杭長を L 、築造する改良体長を H とした場合、築造する改良体の体積 V は

$$V = D_k^2 \times H \times \pi / 4$$

となる。また、孔底堆積土の体積 V_s は、 D_k と D_s の間の土 (図では赤い斜線部) が既存杭に付着して孔外に排出されずに孔内に堆積したものと仮定すれば

$$V_s = D_k^2 \times H \times \pi / 4 - D_s^2 \times L \times \pi / 4$$

となり、杭周ソイルを含めた既存杭の体積分だけ孔内の土量が減少する。そのため、固化材スラリーを添加することによる体積増加を見込んで、孔底堆積土のみを原土とする改良体で撤去孔全体を充填することは困難だと考えられる。

そこで本工法では不足する原土を補うために、孔底堆積土に体積調整砂を加えて固化材スラリーと攪拌混合して改良体を築造する。通常、既存杭撤去後の孔内は孔壁の保護のため水で満たされており、孔底堆積土と体積調整砂を合わせた攪拌対象土はほぼ飽和状態にあると考えられるの

で、攪拌対象土体積 + 固化材スラリー体積 = 改良体体積となる。体積調整砂の体積を V_a 、攪拌対象土 1m^3 当りに添加する固化材スラリー量を $\Delta V_{SL} = \alpha \text{ l/m}^3$ とおけば、

$$(V_s + V_a) \times (1 + \alpha / 1000) = D_k^2 \times H \times \pi / 4$$

より、必要な体積調整砂の体積 V_a は

$$V_a = D_k^2 \times H \times \pi / 4 - D_s^2 \times L \times \pi / 4 \times \{ \alpha / (\alpha + 1000) \}$$

となる。

4.3 固化材添加量の設定

通常の地盤改良工事では事前に配合試験を実施し、目標強度に応じて固化材添加量を決定するのが一般的である。しかし本工法の適用対象となる工事では事前に攪拌対象土を入手することが極めて困難なので、対象現場毎に配合試験を実施して固化材添加量を決定することは現実的ではない。また、固化材スラリー添加量を固定することで体積調整砂の算定方法が簡易になるため、本工法では固化材添加量と水/固化材比は一定として施工することを前提としている。

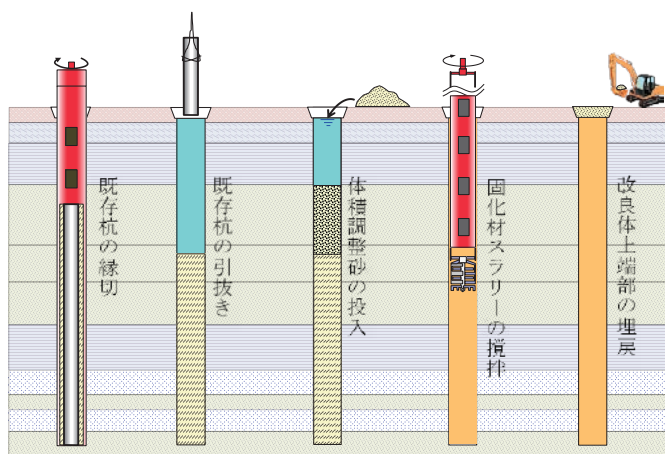


図 4 FUNC-RES 工法の手順

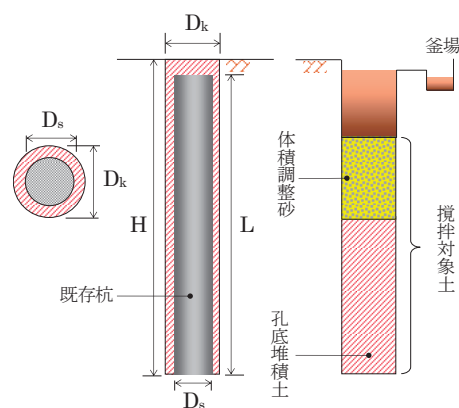


図 5 縁切・引抜き工法による撤去孔の概念

§5. プレ攪拌施工実験

5.1 プレ攪拌施工実験の概要

プレ攪拌施工実験は既存杭の引抜き孔を模擬した試験孔を使用して実施した。まず直径 1.0m のオーガを用いて N 値 2~4 程度の粘性土地盤を深さ 6.0m まで掘削し、内部の粘性土を完全に排出した。次に試験孔に所定量の水を注水した後、火山灰質粘性土(以下、筑西粘土と称する)、砂(以下、岩瀬砂と称する)あるいは両者を体積比で 1:1.0 に混合した混合土(以下、混合土と称する)を模擬孔底堆積土として投入した。図 6 に筑西粘土、岩瀬砂、混合土の粒度曲線を示す。なお、プレ攪拌施工実験では前述の通り、模擬孔底堆積土の種類によらず固化材添加量: $\Delta Mc=200\text{kg/m}^3$ 、水/固化材比: $W/C=100\%$ 、固化材スラリー添加量: $\Delta V_{Sl}=264\text{l/m}^3$ は一定として実施した。

プレ攪拌施工実験の概要を図 7 に示す。対象とした模擬孔底堆積土は岩瀬砂単体、筑西粘土単体、体積比で 1:1.0 の岩瀬砂と筑西粘土を事前混合した混合土(混合)と、試験孔にまず岩瀬砂を投入した後から同体積の筑西粘土を投入した混合土(2層)の 4 種類として実施した。表 1 上段に実験条件を示す。ドラム回転防止板は開発当初、掘進時に抵抗にならないようにその径方向先端が突起部を含むケーシング外径の内側に収まるように設計したが(防止板:小)、防止板が孔壁に触れずドラム部分の回転阻止力が不十分であったため、先端をケーシング径よりも外側に出し孔壁に食い込ませるように改良した(防止板:大)。また羽根切回数 N (回/m)とは攪拌の程度を表す指数で以下の式で与えられる。

$$N = n \times r \times \left\{ \frac{1}{s_1} + \frac{1}{s_2} \times (R \times 2 - 1) \right\}$$

n: 攪拌翼 + 掘削翼の枚数(枚)

r: オーガ回転数(回/分)

s_1, s_2 : 掘進速度および反復速度(m/分)

R: 反復回数(回)

5.2 プレ攪拌施工実験改良体の強度特性

プレ攪拌施工実験終了後、約 1ヶ月の養生期間においてボーリングによりそれぞれの改良体全長からコア試料を採取し、各改良体について深度 1m ごとに 3 本、計 18 本の供試体を整形して一軸圧縮試験を実施した。表 1 下段にそれぞれの改良体の平均一軸圧縮強さと標準偏差、変動係数を示す(供試体数はそれぞれ 18 本)。

岩瀬砂単体のため攪拌は容易であろうと想定した P-1 は、施工速度を重視し羽根切回数が極端に少ない条件としたが、深度 2m までの平均一軸圧縮強さが 1,695kN/m² に対して、2m 以深の平均一軸圧縮強さが 202kN/m² と、変動係数が突出して大きいことから十分な攪拌が出来なかった

と考えられる。

一方で攪拌が最も困難であろうと予想された塊状の粘土の場合、平均一軸圧縮強さや変動係数の傾向から、ドラム回転防止板が小さい P-4 ではドラムおよび固定翼の共回りが生じて攪拌が不十分であったのに対し、防止板が大きい P-9 では共回りが生じず良好な攪拌がなされたと考えられる。

また、P-6~P-8 は同量の筑西粘土と岩瀬砂を使用しているため、全体の粒度は同様と想定される改良体であるが、同じ 2 層地盤なら羽根切回数が多い方が、また 2 層地盤よりも事前混合土の方が、より攪拌されやすいため発現強度が大きくなったと考えられる。

以上の結果から対象土質によらず羽根切回数 $N \geq 528$ 回では良好な攪拌混合が実施できたと考えられる。

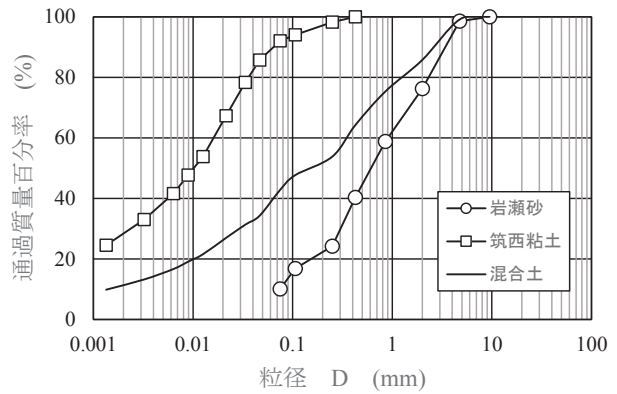


図 6 プレ攪拌施工実験に使用した試料の粒度曲線

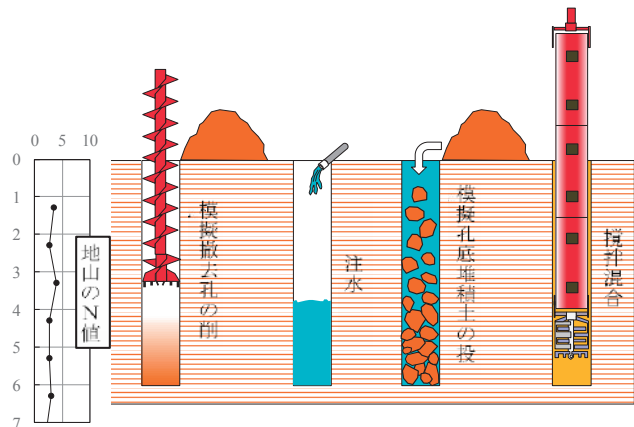


図 7 プレ攪拌施工実験の手順

表 1 プレ攪拌施工実験の条件と改良体の強度とばらつき

試験名	P-1	P-4	P-9	P-6	P-7	P-8
模擬孔底堆積土	岩瀬砂	筑西粘土		混合土(混合)	混合土(2層)	
ドラム回転防止板	大	小	大	小	大	大
羽根切回数(回/m)	132	1056	1056	1056	528	1584
平均 q_u (kN/m ²)	700	615	1037	1326	486	954
標準偏差(kN/m ²)	1013	551	361	242	226	435
変動係数	1.449	0.832	0.348	0.183	0.465	0.456

§6. 実大攪拌施工実験

表 2 実大攪拌施工実験の条件

改良体名	RP-1	RP-2		RP-3
	上下層共通	上層部分	下層部分	上下層共通
固化材添加量 (kg/m ³)	75	100	50	100
水/固化材比 (%)	235	235	235	168
掘進・反復速度 (m/分)	1.0	1.0	2.0	1.0
羽根切回数 (回/m)	528	528	268	528

6.1 実大攪拌施工実験の概要

ブレ攪拌施工実験の結果を踏まえて、より実施工に近い条件で攪拌性能を検証するために、実際の既製杭を使った実大攪拌施工実験を実施し、コア試料による改良体の一軸圧縮試験と孔曲がり実験を実施した。本実験では予め打設した杭径 500mm (杭周ソイル径 650mm)、杭長 30m の既製コンクリート杭を縁切・引抜き工法で引抜き、所定の体積調整砂を投入して攪拌混合を実施した。

実験工事に先立ち対象地盤のボーリング調査を行い、採取したコア試料と体積調整砂を想定される体積比で混合した想定攪拌対象土の配合試験を実施した。その結果とブレ施工実験の結果を踏まえ、 $q_u \geq 200 \text{ kN/m}^2$ を改良体の目標強度として固化材添加量: ΔMC 、水/固化材比: W/C は表 2 のように設定した。

実大攪拌施工実験では体積調整砂の投入量を統一するため $\Delta V_{Sl} = 200 \text{ l/m}^3$ は一定とし、そのため W/C は ΔMC に応じて変更した。また、RP-2 については下層部分と上層部分で固化材添加量を変更したが、これは攪拌されて流動化した未固結の改良土が沈降して硬化する際に、下層部分の改良体は構成する土粒子の平均粒径が大きくなり、加えて圧密効果で密度が増大するため発現強度が大きくなると予測したためである。改良体全体に加える固化材量は RP-1 と同一で掘進および反転速度で固化材添加量を調整したため、下層部分は固化材添加量と羽根切回数が上層部分の半分としている。

6.2 改良体の強度特性

図 8 は各改良体を築造後、約 1 ヶ月の養生期間を置いて採取したコア試料による一軸圧縮強さの深度分布を示したもので、図中の数字は上層あるいは下層部分の平均一軸圧縮強さを示している。この図から各改良体とも予測に反して改良体下層部分の強度が上層部分よりも小さいことが分かる。いずれも下層部の供試体の方が湿潤密度が大きく、含水比は低かったことから、強度が低いのは固化材添加量が想定より少なかったためと考えられる。その原因として固化材スラリー密度が孔内の泥水密度よりも小さく、攪拌混合時に泥水中を浮上して孔口から溢れた泥水と共に流失したためと考えられる。

6.3 実大攪拌施工実験での孔曲がり実験

コア試料採取後の各改良体について実施した孔曲がり試験手順の概要を図 9 に、掘削孔の平面図と傾斜値の算出方法を図 10 に示す。図に示すように、各改良体についてラップ部分大きい掘削孔 A と小さい掘削孔 B の 2 種類の

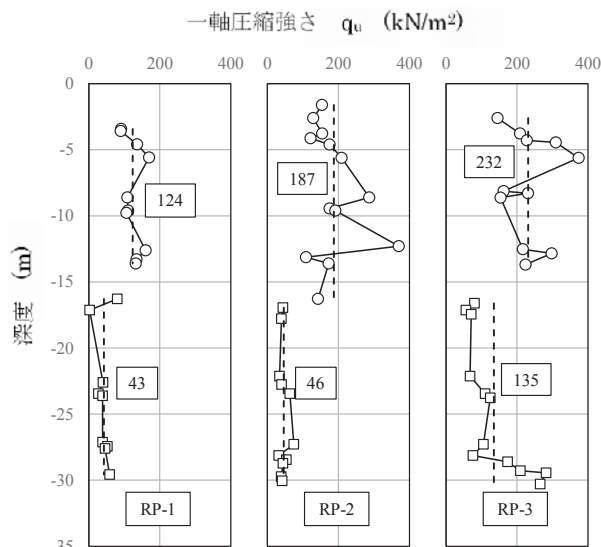


図 8 改良体の一軸圧縮強さの深度分布

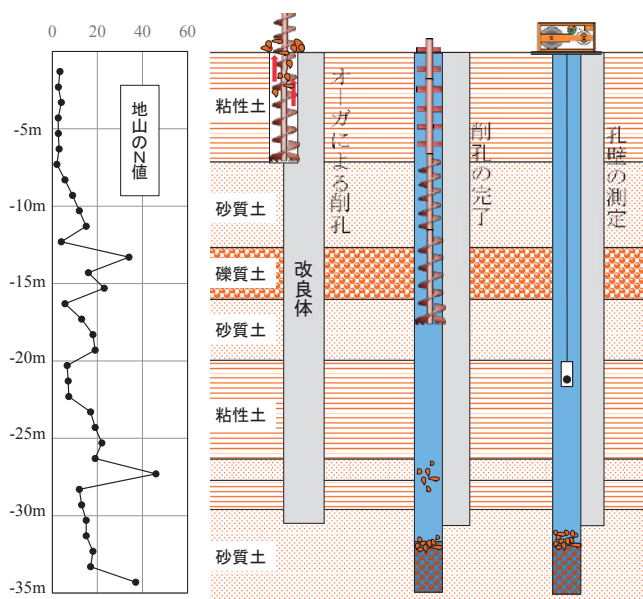


図 9 孔曲がり実験の手順

掘削孔を深度-35mまでスパイラルオーガで削孔した。なお、削孔にあたっては通常の施工時と同様、適宜反復による修正掘削を実施した。その後、孔内に浮遊している粗い土粒子を沈降させ、超音波測量にて改良体側孔壁とその反対側孔壁の位置を連続的に計測した。それらのデータを基に深度 5m ごとに掘削孔の中心位置を推定し、掘削孔の傾斜値を算定した。

実験の結果を表 3 に示す。表中の傾斜値は改良体方向に傾斜している場合を正としており、何らかの理由で掘削孔の中心が算定できなかった場合は空欄となっている。RP-3 では全ての深度で一般的な杭工事(既製コンクリート杭、場所打ち杭等)の許容値である傾斜値: 1/100 以下を満足したが、RP-1 と RP-2 では表中のグレーのハッチングの箇所、いずれも改良体方向への孔曲がりが生じていることがわかる。原因として、この 2 本の改良体は下層部の強度が特に低かったため、改良体方向へオーガ先端が引き込まれたためと推察できる。

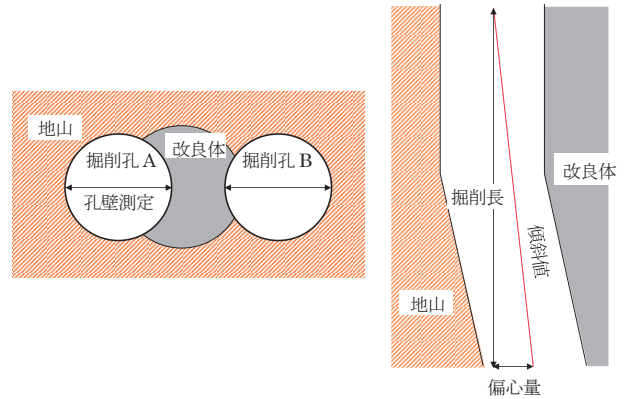


図 10 掘削孔の平面図と傾斜値の算出方法

§7. おわりに

筆者らは、建物撤去後の地中に存置された既存杭と干渉する位置に打設する新設杭をスムーズに施工するために、既存杭撤去孔を均質な改良土で埋戻す工法を開発した。また、新たに開発した攪拌装置の性能を検証するために実施した模擬孔底堆積土を使用したプレ攪拌施工実験と実際の既製杭を使用した実大攪拌施工実験の結果から、以下の事が明らかになった。

- ① 羽根切回数が 528 回/m 以上であれば対象土によらず均質な改良体が築造出来ること。
- ② 実大攪拌施工実験による改良体にラップさせて削孔した掘削孔の孔曲がり実験の結果から、改良体の平均一軸圧縮強さが $q_u \geq 135 \text{ kN/m}^2$ であれば深さ 30.5m までは通常の品質管理基準値を満足する傾斜値で掘削可能であること。
- ③ 改良体を多段階に分けて築造する場合、固化材スラリー密度が小さいと改良体下層部の強度発現が小さくなること。

また本工法を適用する工事ではその性質上、事前に配合試験を実施して固化材添加量を決定する従来の地盤改良工法の手法を取ることは極めて困難であるため、工事の迅速化および簡略化を優先して、固化材の添加量を一定として実施することを前提としている。そのため、全国 7 ヶ所の杭打設現場から採取した孔底堆積土を使用した室内試験の結果から、固化材添加量: $\Delta M_c = 150 \text{ kg/m}^3$ 、水/固化材比: $W/C = 100\%$ であれば $202 \text{ kN/m}^2 \leq q_u \leq 1,326 \text{ kN/m}^2$ を確保できることが分かっている。なお、本工法は「FUNC-RES 工法(杭引抜き孔の再生改良工法)」として(一財)日本建築総合試験所において 2020 年 4 月に建築技術性能証明を取得しており、本工法および攪拌装置については特許を出願中である。

表 3 各改良体についての孔曲がり実験結果

	RP-1		RP-2		RP-3	
	掘削孔A	掘削孔B	掘削孔A	掘削孔B	掘削孔A	掘削孔B
-5m	1/63	1/84	1/172	1/52	1/185	1/1000
-10m	1/63	-	1/144	1/144	1/263	1/350
-15m	1/60	-	-	1/3000	1/209	1/263
-20m	-	1/145	-	1/148	-	-
-25m	1/139	1/543	1/568	1/91	-	-
-30m	1/218	-	1/348	-	1/384	1/349

謝辞 本開発にあたり、日本コンクリート工業(株) 千種信之氏、浅野恒次氏、長谷川琢磨氏には貴重なご意見とご指導を賜りました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 古垣内靖, 矢島淳二: 新設杭を構築するうえでの既存杭撤去後の埋戻し方法とその注意点, 「建築技術」株式会社建築技術出版, pp.104-107, 2018.7
- 2) 三嶋伸也ほか: 既存杭撤去孔の固化材スラリー注入攪拌改良工法(FNC-R 工法)の開発 その 1. 工法の概要と開発した攪拌装置, 建築学会梗概集, 20324, 2020.9
- 3) 北島明ほか: 既存杭撤去孔の固化材スラリー注入攪拌改良工法(FNC-R 工法)の開発 その 2. プレ攪拌施工実験による改良体の築造と掘削心ズレ実験の結果, 建築学会梗概集, 20325, 2020.9
- 4) パイルフォーラム: 既存杭の引抜き処理と新設杭の施工における問題, パイルフォーラム(株)第 9 回技術交流会資料, 2017.11.

ひとこと

既存杭撤去孔に関するトラブルは以前から指摘されていますが埋戻しに関する具体的な基準はありません。本工法が有効な対策工として実績を積み、新たな管理基準策定の一助となれば幸甚です。



北島 明