

二軸回転翼型攪拌混合機の開発

DAM 工法

福島伸二・渋谷光男・平野高嗣・五ノ井淳

現在、老朽化したため池やフィルダムの堤体改修に池内に堆積した底泥土をセメント系固化材により固化改良して築堤土に利用できる砕・転圧盛土工法が採用されており、底泥土の初期固化にはトレンチャー型の攪拌混合機が使用されることが多い。しかし、トレンチャー型機は築堤規模が大きいフィルダムの堤体改修では攪拌能力に不足する問題がある。

本稿では、フィルダムの堤体改修にも対応できる攪拌能力を有する新型機として開発した二軸回転翼型攪拌混合機（DAM 工法）の概要と、新型機を現場に投入前にその攪拌性能を試験施工の実施により確認した結果について報告するものである。

キーワード：攪拌混合機，開発，底泥土，固化処理，砕・転圧盛土工法

1. はじめに

老朽化したフィルダムやため池の堤体改修（補強や漏水防止）に貯水池内に堆積した底泥土を、所要の強度と遮水性をもつように固化改良して築堤土に利用することができる砕・転圧盛土工法^{1), 2)}が適用されている。現在、砕・転圧盛土工法における底泥土の初期固化には汎用性のあるバックホウをベースマシンに利用したトレンチャー型攪拌混合機が使用されることが多い。しかし、この機械は築堤規模が大きいフィルダムの堤体改修には攪拌能力が不足する問題がある。

本稿では、ベースマシンを共通にしつつトレンチャー型機に代わるフィルダムの堤体改修にも対応できる攪拌能力を有する新しい二軸回転翼型攪拌混合機：DAM（Double Axial Mixing）工法の概要と、その攪拌混合性能を実施工レベルで確認した結果を報告するものである。

2. 砕・転圧盛土工法の概要

砕・転圧盛土工法^{1), 2)}は、図-1に概念的に示すように、池内に堆積した底泥土の除去と堤体改修を同時に行うために、底泥土をセメント系固化材の添加により所要の強度と遮水性を有する築堤土に固化改良して、堤体改修（補強や漏水防止）のためのコアゾーンやシェルゾーンを築造するものである。攪拌混合機は幅約5m×深さ2～3m×長さ約25mのピット内に

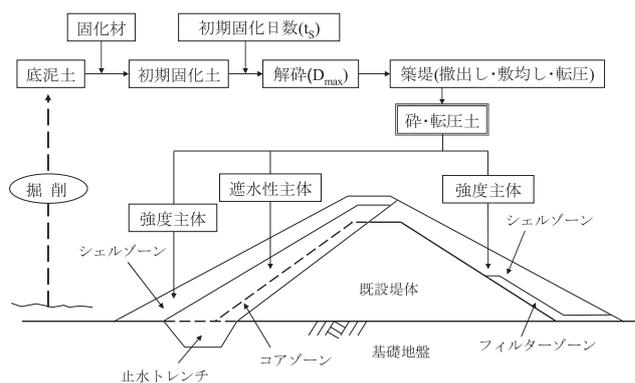


図-1 砕・転圧盛土工法の概念図

投入した底泥土にスラリー化した固化材を添加・混合した固化処理土、いわゆる初期固化土を準備するのに使用される。築堤は一定の初期固化日数 t_0 だけ経過させた固化途中にある初期固化土を規定の最大粒径 D_{max} で解砕してから、通常の築堤土の場合と同様に均一に撤出し、一定層厚に敷均してから規定回数 N 回だけ転圧して行う（この状態にある固化処理土を砕・転圧土という）。堤体表層部は法面垂直方向に厚さ50cm程度の覆土を設けるのを基本とするが、覆土は砕・転圧土部の乾・湿繰返しによる劣化防止、高アルカリ水の溶出防止、そして張芝などの植栽の基盤層とするためである。

従来、単なる底泥土に固化材を添加しただけの固化処理土（初期固化土に相当）は、強度を固化材添加量の加減により容易に制御できるものの、通常の築堤土と比較すると破壊時のひずみが小さく脆性的なひずみ

軟化型の応力～ひずみ特性を示し、既設堤体との間の極端な強度や変形性の相違に起因したクラックが生じやすく貯水用の堤体には使用できなかった。砕・転圧盛土工法は、固化処理土を築堤土に利用する場合の問題点を、一定日数 t_s だけ初期固化させた底泥土を固化途上中に解砕して通常の築堤土と同様に転圧して築堤すると、再固化時の応力～ひずみ特性が通常の築堤土と似たひずみ硬化型になる性質を利用して既設堤体との密着性（なじみ）を良くしたものである。

3. 新型攪拌混合機の開発目標

現在、砕・転圧盛土工法における底泥土の初期固化に使用しているうちで最も大型のトレンチャー型機は、ベースマシンに山積み 1.4 m^3 級バックホウを使用しているもので、約 $200\sim 250\text{ m}^3$ ／日の攪拌能力を有している。ため池の堤体改修工事は築堤規模が小さく、この程度の攪拌能力であれば十分である。しかしながら、フィルダムの堤体改修は築堤規模が大きく、効率的な施工のためにはさらに高い攪拌能力が要求されることが多い。

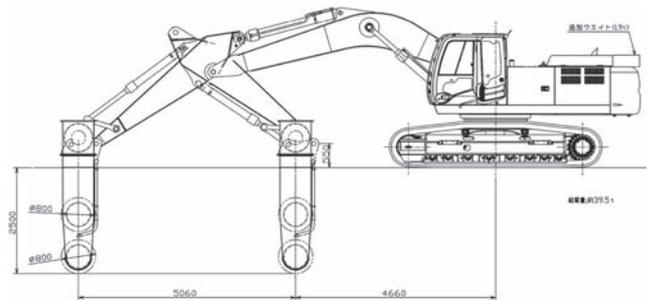
トレンチャー型機をそのまま大型化する方法も考えられるが、ベースマシンが大型化し通常のトレーラーによる運搬が不可能になり汎用性が損なわれてしまう問題がある。また、トレンチャー型機は、もともとヘドロのような超軟弱土の固化を目的に開発されてきた経緯からわかるように、底泥土に掘削土を混合したような砂礫分の多い混合泥土を固化するには攪拌トルクが不足する場合もあることや、攪拌部の破損や故障が発生しやすいなどさらに耐久性に優れた機械も必要になってくる。そこで、以上の要求に答えられる、攪拌能力の高い、耐久性に優れた攪拌混合機を新たに開発することになった。新型機は、

- ①現行のトレンチャー型機と同じベースマシン（山積み 1.4 m^3 級）を使用する、
 - ②攪拌能力は $450\sim 500\text{ m}^3$ ／日程度とする、
 - ③攪拌部が構造的に頑丈である、
- ことを開発目標とした。

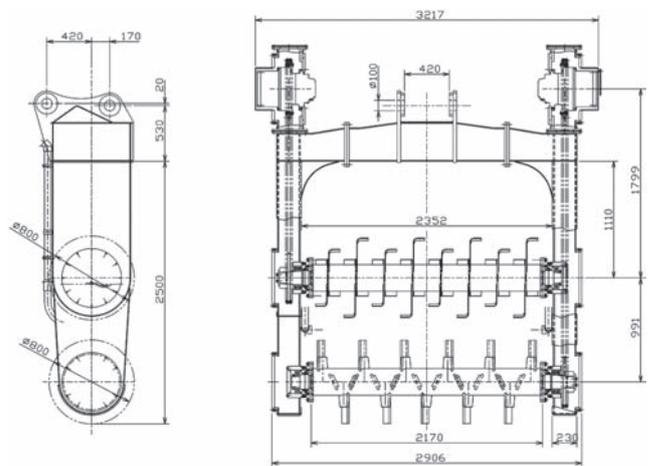
4. 新型攪拌混合機（DAM工法機）の概要

新型機による攪拌混合は、深さ 2.5 m 程度のピット内に投入した底泥土とスラリー化した固化材を混合するために、図一2に示すように、攪拌部をトレンチャー型機と同様に鉛直方向に押し込みと引抜き、横行をピット内で繰り返す形式とした。DAM機の攪拌部は、

攪拌能力が攪拌部の押し込み範囲（幅×奥行き）と深さにより決まることから、図一3に示すように、攪拌深さ 2.5 m 、攪拌範囲 $2.17\text{ m}\times 0.9\text{ m}$ とした門型ミキシングフレームに攪拌翼を一定間隔で取り付けられた回転軸を上・下の2段に装着したものである。



図一2 DAM攪拌混合機の全体図



図一3 攪拌部アタッチメント

攪拌翼は耐久性に優れたパドル型と、攪拌の均一性に優れたチョッパー型の2種類とし、上・下段の回転軸で使い分けることとした。写真一1にはDAM機のみキシングフレーム部分を示す。下段軸には攪拌部を底泥土中に押し込むには掘削攪拌を伴うため頑丈



写真一1 DAM工法機の攪拌混合部

で単純な翼構造のパドル型のみを使用することにした。上段軸には底泥土の性質に応じてパドル型あるいはチョッパー型のうちから選択するものとし、砂礫分のような粗粒子を含む底泥土、あるいは掘削土等を加えた混合泥土のように攪拌抵抗が大きい場合にはパドル型、高含水比な底泥土のように攪拌抵抗が低い場合にはチョッパー型とすることにした。

攪拌軸の回転方向は、攪拌中の抵抗を少なくするためや、多様な攪拌パターンが達成できるように、上・下軸がそれぞれ独立に正・逆回転できるようにした。また、回転速度は掘削攪拌を伴う下軸を低速回転（最大56 rpm）、攪拌抵抗が小さい上段軸を下段軸の約1.3倍の高速回転（最大71 rpm）とした。上・下の回転翼の正・逆回転は攪拌泥土が上・下段軸間を交差状に移動させて回転翼間を均一に攪拌できるようにしたものである。

5. 攪拌性能確認のための試験施工

(1) 攪拌速度の影響

実施工で想定する攪拌速度において均一な初期固化ができることを確認するために、攪拌速度を変えた試験施工を実施した。試験は堤体改修工事中のSOダムの池敷内地盤に、図-4に示すような、幅5m×長さ10mで深さ2.5mの固化ピットで実施した。ピット内には池内に堆積した底泥土を $Z_M = 1.0$ m、既設堤体土を $Z_E = 1.5$ m で投入して混合泥土を準備した（混合比 $n_V = Z_E/Z_M = 1.50$ ）。固化ピットは図に示すように長さ2m毎に5列に分け（1列 25 m^3 ）、各列で攪拌速度を変えた。

固化材は底泥土のような高含水比軟弱土の固化に適

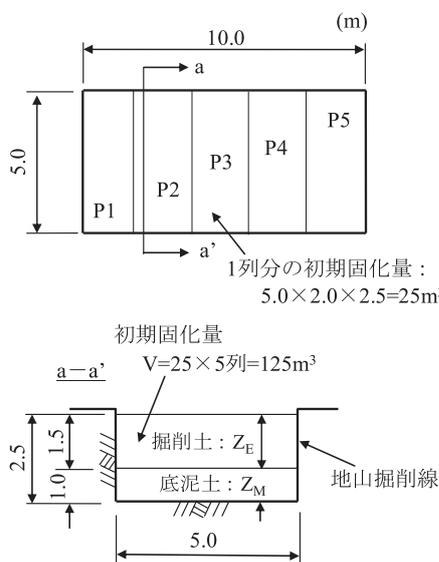


図-4 固化ピットの形状

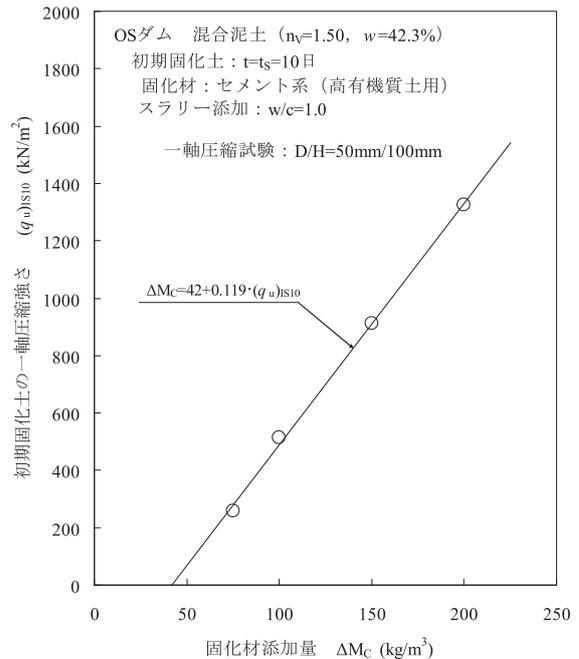


図-5 室内配合試験による $(q_u)_{IS10}$ と ΔM_C の関係

したセメント系（高有機質土用）を使用した。混合泥土の固化強度特性は固化材添加量 ΔM_C (kg/m^3) を変えて実施した室内配合試験により図-5に示すような一軸圧縮強さ $(q_u)_{IS10}$ （固化材添加後 $t = 10$ 日目）と ΔM_C の関係を求めた。 $(q_u)_{IS10} \sim \Delta M_C$ 関係は直線

$$\Delta M_C = 42 + 0.119 \cdot (q_u)_{IS10}$$

によりほぼ近似できる。目標とする一軸圧縮強さ $(q_u)_{IS}^*$ は $(q_u)_{IS}^* = 706 \text{ kN/m}^2$ に設定し、これを現場で達成するための固化材添加量 $\Delta M_C = \Delta M_C^*$ は、上式の $(q_u)_{IS10}$ に $(q_u)_{IS}^*$ を現場・室内強度比 $a_{FL} = 1/1.5$ により割り増した室内配合強度 $(q_u)_{IS}^* / a_{FL}$ を代入して

$$\Delta M_C^* = 42 + 0.119 \times 700 \times 1.5 = 168 \text{ kg/m}^3$$

のように算定した。現場での添加量 ΔM_C は、 ΔM_C^* が配合試験で基準とした底泥土の含水比 w_0 と粒度 F_{C0} における値のためピット内の底泥土の含水比 w と粒度 F_C を測定し、基準値との差に応じて補正した²⁾。固化材は ΔM_C に相当する水・セメント比 $w/c = 1.0$ のスラリーをプラントから各列の攪拌速度に応じてDAM機に供給した。ピットに送るスラリー量 V_{SL} は、ピット内の混合泥土の体積 V に対する固化材質量を $M_C = \Delta M_C \cdot V$ 、スラリー質量を $M_{SL} = M_C \cdot (1 + w/c)$ 、固化材密度を $\rho_C (= 3.12 \text{ t/m}^3)$ 、スラリー水質量を M_{CW} とすると、固化材体積 $V_C = M_C / \rho_C$ とスラリー水体積 $V_{CW} = M_{CW} / \rho_w$ (ρ_w : 水の密度) から $V_{SL} = V_C + V_{CW}$ となるから

$$\begin{aligned} V_{SL} &= \Delta M_C \cdot V \cdot \{1/\rho_C + (w/c) / \rho_w\} \\ &= 0.168 \times 25 \times (1/3.12 + 1.0/1.0) = 5.546 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

となる。

攪拌速度は2組のスラリープラントにより表—1に示すようにピット内区画1列 25 m³の攪拌時間を t = 12 ~ 40 として 125 ~ 37.5 m³/hr. の範囲で変えた。写真—2には DAM 機による固化材の攪拌混合状況を示す。ピット内の各列の強度を調べるために、固化材を添加した直後のまだ固まらない状態にあるうちに、ピット内各列の深さ約 50 cm に内径 D = 75 mm 長さ H = 150 mm の真鍮製シンウォールチューブを4個埋設し、翌日掘り出して採取し、上・下端面を整形して供試体を準備した。供試体は乾燥しないようにビニールシートで保護して試験室に保管し、10日目に一軸圧縮試験を実施した。

表—1 固化ピット内の各列の攪拌時間

ピット区分	攪拌時間 T (min.)	各ピットのスラリー量 V _{sl} (m ³)	攪拌速度 (m ³ /hr.)	スラリー供給量 ΔQ (t/min.)
P1	12	5.546	125	462 (2×231)
P2	15		100	370 (2×185)
P3	20		75	277 (2×139)
P4	30		50	185 (2×92)
P5	40		37.5	139 (2×69)

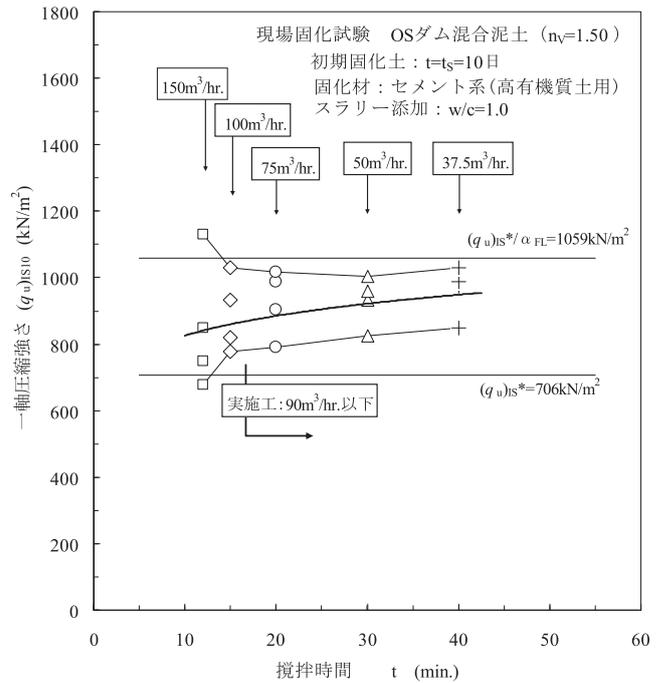


写真—2 DAM機による攪拌状況

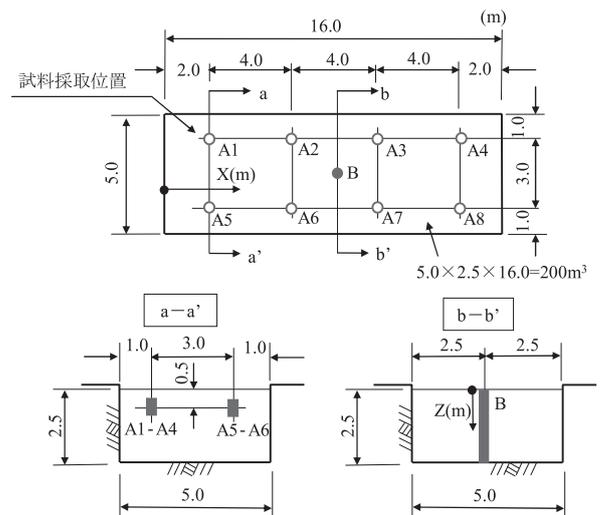
試験から得られた強度 $(q_u)_{IS}$ と攪拌時間 t の関係を図—6に示す。図中には、目標強度 $(q_u)_{IS}^*$ と現場・室内強度比 a_{FL} による割増し強度 $(q_u)_{IS}^* / a_{FL}$ の範囲を示してある。図から、攪拌時間が増加するほど、最大・最小の強度範囲が少なくなり、平均強度がやや増加する傾向にあるものの、攪拌速度が 100 m³/hr. 以下であれば強度の目標範囲内になるように初期固化できることがわかる。

(2) ピット内の固化強度の空間的変動

ピット内の各位置で均一な初期固化ができることを確認するために、図—7に示す幅 5 m × 長さ 16 m × 深さ 2.5 m のピット内で混合泥土に固化材を一定の攪拌速度 75 m³/hr. により添加混合し、ピット平面内の各位置 A1 ~ A8 と、ピット中央部の位置 B から供試



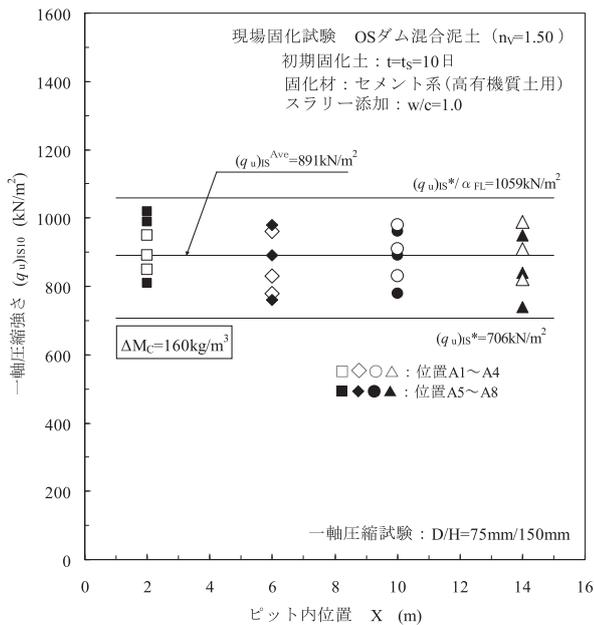
図—6 攪拌時間が初期固化強度に及ぼす影響



図—7 ピット内の強度の空間的変動を調べるための試験

体採取して t = 10 日後に一軸圧縮試験を実施した。平面内位置 A1 ~ A8 からの供試体は、まだ固化しないうちに約 50 cm 深さにシンウォールチューブを埋設して採取した。また、深さ方向の強度分布を調べるために、ピット中央部の位置 B において、まだ固まらないうちに塩ビパイプ US80 (外径 φ 80 mm × 2.5 mm × 長さ 2500 mm) を埋設して連続供試体採取し、長さ 150 mm 毎に切断した供試体の一軸圧縮試験を t = 10 日目に実施した。

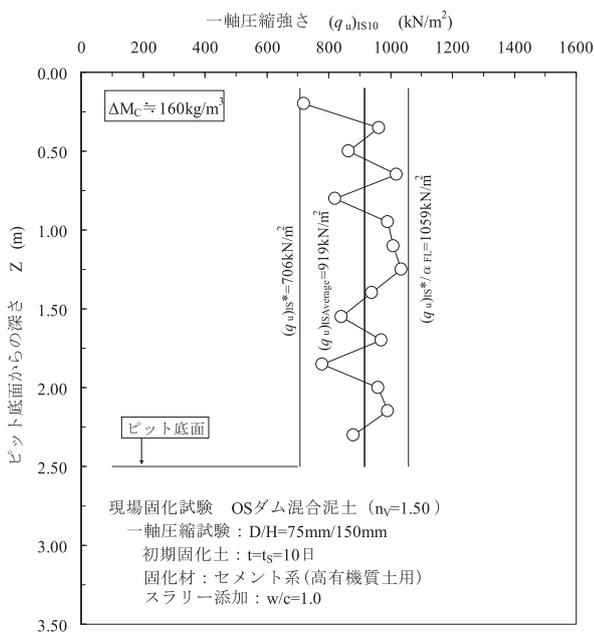
図—8はピット内の平面的な強度の変動を調べた試験結果を示し、白抜き記号 (□◇○△) は試料採取位置 A1 ~ A4 における $(q_u)_{IS10}$ を、黒塗り記号 (■◆●▲) は試料採取位置 A5 ~ A8 における $(q_u)_{IS10}$ をそれぞれ



図一八 固化ピット内の強度の空間的な変動

れ示している。平面内の各位置の $(q_u)_{IS10}$ の値はどの位置においても偏りなく、すべて目標強度範囲内にあることがわかる。

また、図一九には位置Bで採取した連続供試体を切断して求めた深さ方向の強度分布を示す。図から、深さ方向での強度は位置によりバラツキが見られるものの、すべて目標強度の範囲内にあることがわかる。



図一九 固化ピット内の強度の深さ方向の変動

6. おわりに

ダムの堤体改修を行う場合にも対応できる攪拌能力をもつように新たに開発した二軸回転型攪拌混合機(DAM工法)の概要と攪拌混合性能を実施レベルで実施した確認試験結果を報告した。試験結果によると、新型機は開発目標とした攪拌能力を有し、底泥土を均一に固化できることが確認できた。DAM工法機は砕・転圧盛土工法の底泥土の初期固化の大規模施工に対応する目的で開発されたものであるが、底泥土の固化処理だけに限定されるものではなく一般の地盤改良工事に適用できるものである。

J C M A

《参考文献》

- 1) (社)農業農村整備情報総合センター：ため池改修工事の効率化，一砕・転圧盛土工法によるため池堤体改修，設計・施工・積算指針（案），2006。
- 2) (社)農業農村整備情報総合センター：砕・転圧盛土工法によるフィルダム堤体改修，一堆积土・発生土を有効利用したフィルダムのリニューアル技術，設計・施工・積算指針（案），2009。

【筆者紹介】



福島 伸二 (ふくしま しんじ)
 (株)フジタ
 建設本部 土木エンジニアリングセンター
 主席コンサルタント



渋谷 光男 (しぶや みつお)
 (株)フジタ
 建設本部 土木エンジニアリングセンター
 機械部 部長



平野 高嗣 (ひらの たかつぐ)
 (株)フジタ
 建設本部 土木エンジニアリングセンター
 機械部



五ノ井 淳 (ごのい じゅん)
 (株)フジタ
 東北支店 土木工事部
 現場所長